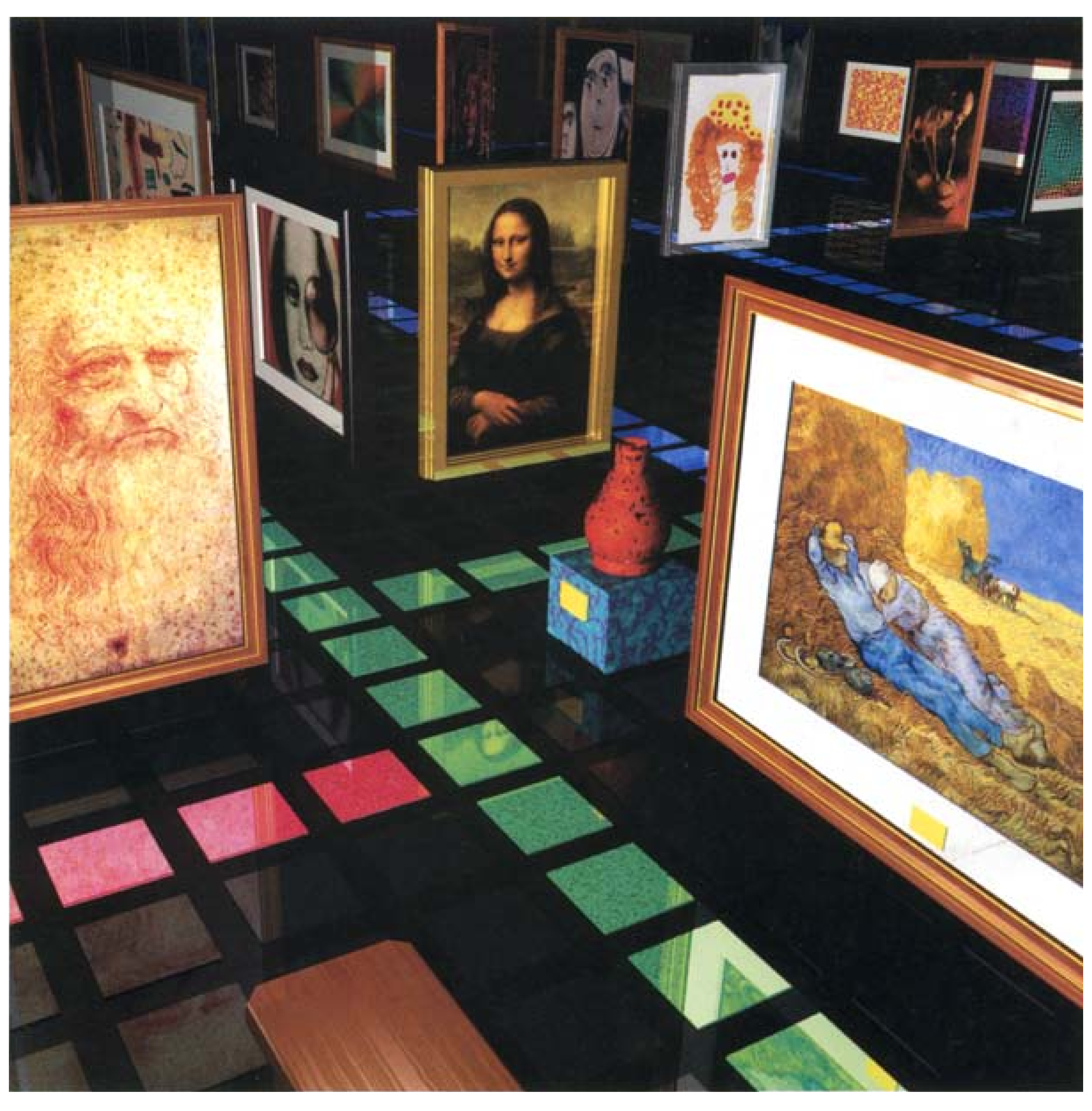
INVESTIGACION y CIENCIA

MAQUINAS DOTADAS DE CAPACIDAD DE APRENDIZAJE

HISTORIA DEL INFINITO

BASES GENETICAS DEL COMPORTAMIENTO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



MUSEO VIRTUAL

JUNIO 1995
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Junio de 1995 Número 225

Edición española de





SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Declive de las poblaciones de anfibios*; Mónica E. Murphy: *Los confines de la heliosfera*; Santiago Torres: *Genética del comportamiento*; Juan P. Campos: *La computadora del historiador del arte*; Luis Bou: *Breve historia del infinito*, *Creaciones informáticas* y *Juegos matemáticos*; J. M. García de la Mora: *Reparto del poder en una ciudad mesopotámica*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*

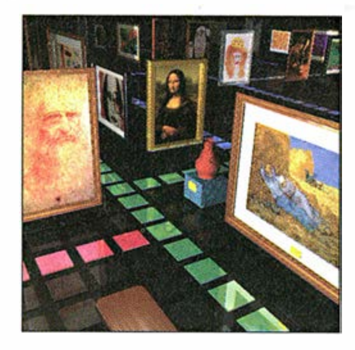
Ciencia y sociedad:

Mónica E. Murphy

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Slim Films

Página	Fuente
9	Roberto Osti
10	Kevin Horgan (*izda.*); Cabisco Visual Unlimited (*dcha.*)
11	M. Alpern; cortesía de A. Sailhac y H. Vian (*izda.*); Badzic, Sipa Press (*dcha.*)
12	K. Uhlenhust (*sup. izda.*); K. Taylor (*sup. centro*); Z. Leszozynski (*sup. dcha.*); J. Hanken (*inf. izda.*); M. Fogden (*inf. dcha.*)
13	S. J. Richards (*sup. izda.*); H. Reinhard (*sup. centro*); M. Fogden (*sup. dcha.*); B. y C. Calhoun (*inf. izda.*); W. Duellmann, Museo de Historia Natural de Kansas (*inf. dcha.*)
15	Tomo Narashima
16	J. R. Jokipii
17	Laboratorio de Propulsión a Chorro
18	J. R. Jokipii
20	Michael Goodman
23	Dan Wagner
24	Dan Wagner (*arriba*); Roberto Osti (*abajo*)
25	Roberto Osti
26-27	Dan Wagner (*abajo*); Jean Miele, The Stock Market (*foto sup.*); Lisa Burnett (*gráfico*)
42-43	Suzanne Barnes
44	Archivo Bettmann (*arriba*); Lab. Cold Spring Harbor (*abajo*)
45-46	Jared Schneidman Design
47	JSD; fuente: Charalambos P. Kyriacou y J. C. Hall (*izda.*); N. Kane, S. Broughton y K. Raphael, Univ. de Nueva York (*dcha.*)
48	Lillian Schwartz © 1995 Computer Creations Corp.
49	Lillian Schwartz © 1986
50	Lillian Schwartz © 1987; fuente Scala/Art (*inf. dcha*)
51	L. Schwartz © 1992 (*arriba*); Museo di Civico, Italia (*inf. izda.*); L. Schwartz © 1989 (*dcha.*)
52-53	(*arriba, de izda. a dcha.*) Nat. Gallery, Londres; L. Schwartz © 1992; Bib. británica; (*abajo, de izda. a dcha.*) Museo J. Paul Getty, L. da Vinci; Metropolitan M. of Art; Academia de BB.AA., Venecia; L. Schwartz © 1995
55	Gary Yeowell
56-57	Jared Schneidman Design
58	Cortesía del Instituto de Estudios Avanzados
60-61	Jara Brenning
62	Ian Worpole
63	Cortesía de Elizabeth C. Stone
64	Ian Worpole
65	Cortesía de Elizabeth C. Stone
67	Concealing Coloration in the Animal Kingdom, 1909, de Gerald H. Thayer
68-71	Ramón Margalef y Silvia Nuere
72	Manuel Crespo
80-83	Documentos Pour la Science
86-88	Robin Brickman (*dibujo*); DPLS



LA PORTADA muestra un museo virtual, una galería de arte que puede extenderse hasta el infinito y sólo existe dentro del ordenador. Esta imagen tridimensional se elaboró con ayuda del programa Infini-D™ 2.6, para lo que cuatro ordenadores Macintosh necesitaron 86 horas. Entre las obras expuestas pueden verse el *Autorretrato* y la *Monna Lisa* de Leonardo de Vinci; *La Siesta, según Millet*, de Vincent van Gogh y el *Autorretrato* de Lillian Schwartz (*véase* "La computadora del historiador del arte" en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Si el lector se empeña en ingerir arsénico, pero con el deseo de no resultar fatalmente envenenado, quizá pueda salvarse tomando a la vez compuestos de flúor muy tóxicos. Según un informe recientemente elaborado, unas ratas a las que se ofreció trióxido de arsénico mezclado con azúcar no murieron gracias a que habían bebido agua con fluoruro potásico antes y después del arsénico. Aunque el hallazgo sea interesante y pueda arrojar luz acerca de los efectos del arsénico sobre el cuerpo humano, el método es poco recomendable como primer auxilio ya que una sobredosis de fluoruro, un veneno muy común contra las hormigas, es tan mortífero como el mismo arsénico.»

«Un dispositivo electrónico de guarda para los espacios destinados al almacenamiento de alimentos es la lámpara ultravioleta Sterilamp, cuyo aspecto semeja el de un tubo fluorescente adelgazado y que mata bacterias y mohos tanto en la superficie de los alimentos como suspendidos en el aire. Además de los rayos bactericidas, estas lámparas generan en el aire pequeñas cantidades de ozono, gas incoloro que se emplea en el comercio para purificar el agua y los alimentos. El ozono se esparce rápidamente desde las lámparas por todo el espacio de almacenamiento, actuando como arma adicional contra la proliferación de los mohos.»

«Hace menos de dos años los fabricantes trataban frenéticamente de aumentar sus producciones de penicilina para servir la ingente demanda de esta prodigiosa sustancia por parte de las Fuerzas Armadas. Ahora, ese objetivo se ha cubierto con la suficiente largueza para que ya pueda tener salida en farmacias y hospitales civiles. Este potente fármaco, saludado como el descubrimiento más valioso de la medicina moderna durante la guerra, ya está disponible para todo médico que lo necesite.»

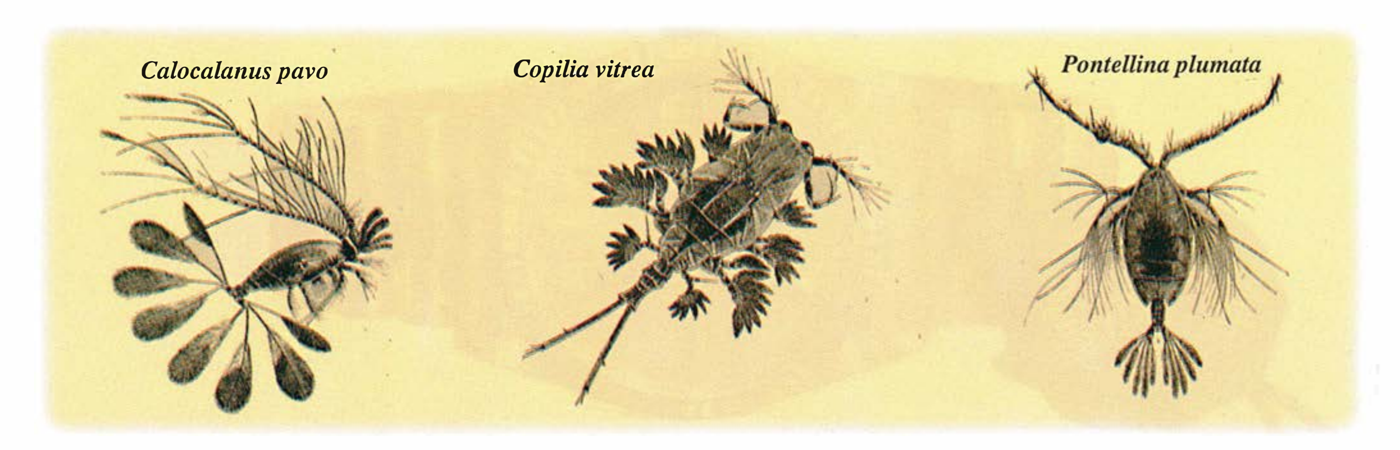
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Los días de los votos tramposos y demás artimañas para falsear los resultados de las elecciones parecen estar contados. El genio inventor ha producido una máquina que no miente e impide los engaños en las votaciones. En cuanto el votante se recupere de la impresión, bastante desagradable, de verse aprisionado en una cámara de acero, comprenderá lo que se espera de él. Dentro de la máquina, los nombres de los candidatos del partido demócrata aparecen impresos sobre un fondo amarillo, los miembros de la candidatura republicana sobre un fondo rojo y los candidatos prohibicionistas sobre un fondo azul. A la derecha de cada nombre hay un pequeño pomo que deberá oprimir para registrar su voto y la máquina se encarga del resto.»

«Afirma el doctor Leslie Phillips que la causa de la calvicie masculina está en el hecho de que los hombres se cortan el cabello: "El pelo de los hombres suele cortarse rebajado desde la infancia, mientras que en las mujeres lo contrario es casi siempre el caso." El doctor Phillips previene a la "nueva mujer" contra el hábito de llevar el cabello corto. Pero como no suele haber teoría sin defectos, podríamos preguntarle al doctor Phillips por qué los hombres que se recortan la barba o se la rasuran no acaban calvos de mentón.»

«El gran meteorito de Chupaderos, descubierto en 1581 partido en dos enormes trozos, puede ahora verse a la entrada de la Escuela Nacional de Minas de Ciudad de México. La forma de los dos pedazos no deja lugar a dudas de que ambos proceden de un mismo meteorito de gran tamaño que pesaba 27 toneladas. Los dos fragmentos se encontraron a una distancia de 240 metros uno del otro en un lugar situado a más de 1400 kilómetros de Ciudad de México. En 1893, más de tres siglos después, ambas piezas fueron transportadas a su actual emplazamiento.»

«Al examinar al microscopio ciertos crustáceos, quedamos sorprendidos de su extraño aspecto. Mencionaremos algunos ejemplos que aquí se ilustran. La especie *Calocalanus pavo*, común en el Mediterráneo, exhibe un cuerpo transparente y en el extremo del abdomen posee ocho plumas de color amarillo dorado simétricamente dispuestas. *Copilia vitrea* es un animalito insólito; cada pata de su cuerpo transparente está provista de un espectacular abanico de microscópicas plumas rojo ladrillo. Por su parte, *Pontellina plumata* presenta abundante y sedosa pilosidad que le adorna patas y abdomen. Tales pelos, a menudo organizados en plumas, contrastan por su color naranja brillante con el azul del cuerpo del animal y la transparencia de los miembros. No cabe duda de que esos filamentos facilitan especialmente las excursiones aéreas del crustáceo y lo sostienen una vez que se eleva en el aire merced a un salto.»



Declive de las poblaciones de anfibios

El número de ranas, sapos y salamandras está descendiendo en muchas zonas del mundo. Por diversas razones, que van desde la destrucción del hábitat local hasta la disminución global de la capa de ozono

Andrew R. Blaustein y David B. Wake

La fascinación que todos sentimos por las ranas y otros anfibios se remonta, quizás, a los años de la niñez, cuando descubrimos el mundo de los renacuajos y su metamorfosis. Pero las cosas han cambiado. Para muchos adultos el interés surge ahora de otro tipo de transformaciones: las poblaciones de anfibios menguan por doquier, y algunos grupos están desapareciendo por completo de sus hábitats nativos. Este declive, reconocido ya en 1990 como un fenómeno mundial, merece cierta atención, no sólo por ser en sí mismo preocupante, sino porque las ranas y sus parientes (principalmente sapos y salamandras) pueden servir de indicadores de la calidad general del ambiente.

Varias son las razones por las que los anfibios se convierten en importantes marcadores de la salud del planeta. En primer lugar, se encuentran en íntimo contacto con muchos componentes de su entorno natural. En su fase larvaria, por ejemplo, las ranas viven en el agua, pero llegada la madurez habitan casi todas en tierra, al menos parcialmente. Su piel fina, húmeda y delicada, permite la respiración; sus huevos carentes de cáscara se encuentran directamente expuestos al suelo, el agua y la luz solar. Las larvas son herbívoras; los adultos, carnívoros. Puesto que los anfibios se desenvuelven en diversos sectores del ambiente, su equilibrio corporal refleja las influencias múltiples que operan en el ecosistema. En segundo lugar, estos animales constituyen excelentes registros de las condiciones locales: no emigran del sitio que les vio nacer, permaneciendo pues, durante toda su vida, confinados en regiones bastante limitadas. Lo que les ocurre a los anfibios se produce en zonas habitadas por el ser humano, de modo que también pudiera afectar a nuestra especie.

Por último, existe tal diversidad entre los anfibios, que podemos descartar la atribución a una sola característica, propia de la clase, la causa de su declive. Sospechamos que la razón principal de su decadencia corresponde a factores ambientales. Los anfibios divergen en tamaño, forma, color, comportamiento, capacidad reproductora, densidad de población e historia natural. Además, están en muchos ecosistemas y hábitats, desde los desiertos hasta las praderas y bosques, desde el nivel del mar hasta las cumbres montañosas. Aunque abundan más en los trópicos, también son frecuentes en las zonas templadas e incluso en latitudes altas, como en Alaska y el Canadá septentrional.

¿Qué factores ambientales pueden explicar el rápido declive de especies que han conseguido, a lo largo de centenares de millones de años, sobrevivir a acontecimientos que llevaron a la extinción en masa de muchas otras, como los dinosaurios? Las explicaciones propuestas difieren casi tanto como las especies de anfibios en peligro, y van desde la destrucción del hábitat hasta las fluctuaciones naturales en el tamaño de la población.

De esas hipótesis, alguna ofrece visos de verosimilitud; otras, no tanto. En las segundas, el daño real podría estar causado por cambios más sutiles e interrelacionados de las condiciones regionales o incluso globales. Ciertos estudios terminados hace un año, por ejemplo, han arribado a un resultado sorprendente, que culpa a la pérdida de ozono estratosférico del daño que sufren los anfibios en determinadas zonas del mundo.

Comenzamos a sospechar del ozono a raíz de los trabajos iniciados en 1979 por el equipo de uno de los autores (Blaustein) en Oregón. Los experimentos más recientes, realizados sobre todo en zonas altas (por encima de los 1200 metros) e inalteradas de la cordillera de las Cascades, abordaron varios aspectos de la vida de diversas especies de anfibios; las estudiamos desde el estadio embrionario (huevo) hasta el estadio adulto, pasando por el de renacuajo. Aunque el grupo pretendía acometer una revisión general del comportamiento y la ecología de los anfibios, obtuvo algunos resultados inesperados.

El grupo registró mortandades masivas de huevos fecundados en dos especies: la rana de las Cascades *(Rana cascadae)* y el sapo occidental *(Bufo boreas)*. Además, advirtió una disminución del número de adultos de estas especies en un intervalo de diez años. Se atribuyó la caída de la población de ranas y sapos adultos a la escasez de huevos fecundados su-

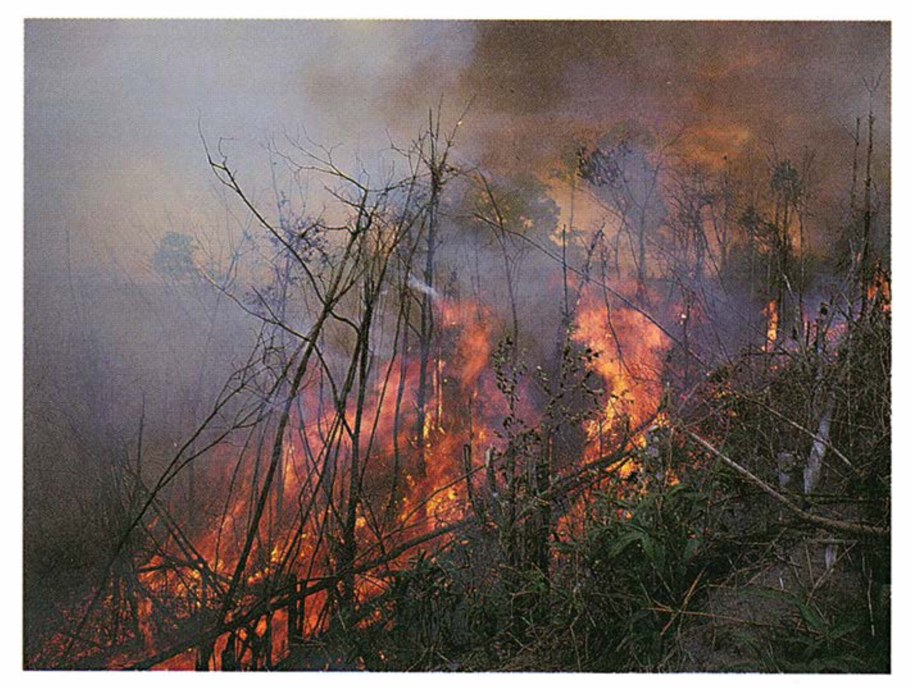
ANDREW R. BLAUSTEIN y DAVID B. WAKE aúnan, en sus estudios sobre los anfibios, el interés por la ecología del comportamiento y la biología evolutiva. Blaustein es profesor de ecología en la Universidad estatal de Oregón; Wake enseña biología evolutiva en la de California en Berkeley. Ambos pertenecen a la Comisión para la Supervivencia de las Especies de la Unión Mundial para la Conservación.

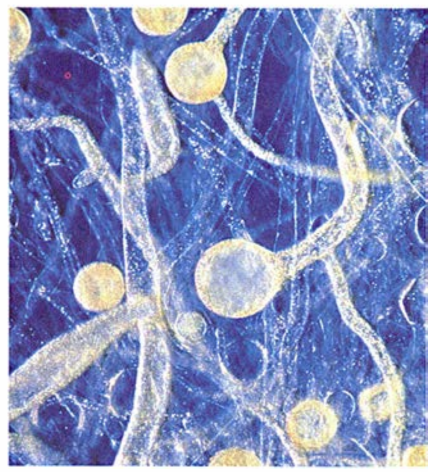
1. LA RADIACION ULTRAVIOLETA que atraviesa el menguante escudo estratosférico de ozono es un peligro para los anfibios que ponen sus huevos al descubierto. Se trata de un tipo de radiación que daña el ADN *(detalle)* y provoca graves pérdidas de huevos fecundados en al menos dos especies de anfibios de Oregón; una de ellas es la rana de las Cascades *(Rana cascadae)*, aquí representada. A su vez, la muerte de los huevos puede ser la causa de la caída observada en el tamaño de las poblaciones.

pervivientes. Y así comenzaron a investigarse los factores que podían afectar a los huevos.

Descartaron en seguida la posibilidad de que esta elevada mortandad se debiera a la química del agua donde los animales ponían los huevos. En efecto, llevaron algunos huevos al laboratorio y criaron los embriones en una muestra de la misma agua lacustre en la que otros huevos que permanecieron en el lago habían muerto. Los embriones de ranas y sapos se desarrollaron y eclosionaron sin problemas en el laboratorio. Además, el análisis químico de los lagos y estanques donde los huevos morían no reveló que hubiera contaminación ni exceso de acidez.

Hacia finales de los ochenta, apareció otra posible causa de destrucción de los huevos. Por aquel entonces, se demostró un debilitamiento del escudo estratosférico de ozono que impide que la mayor parte de la radiación ultravioleta (UV) llegue a la superficie terrestre. Estas observaciones movieron al grupo de Blaustein a plantearse la posibilidad de que un aumento en la exposición a la radiación UV explicase las problemas advertidos en la reproducción. Pensaron, asimismo, que ese fenómeno podría encerrar la razón de que muchas de las especies de anfibios en regresión habitaban en montañas y ponían sus huevos en aguas abiertas, someras a menudo. Estos huevos sufren una exposición prolongada a la radiación solar y, por tanto, a cualquier radiación ultravioleta que atraviese la pantalla de ozono.





2. MULTIPLICIDAD DE CAUSAS que intervienen en el declive de los anfibios. La principal amenaza contra las poblaciones sigue siendo la destrucción del hábitat local, como el incendio de las pluviselvas brasileñas *(izquierda)*. Otras

Conscientes de que la radiación ultravioleta atenta contra la vida de plantas y animales, supusieron que la exposición excesiva a esos rayos podía tener algo que ver con los problemas de la rana de las Cascades y el sapo occidental. En particular, la radiación ultravioleta-B (con una longitud de onda entre 280 y 320 nanómetros), que ocupa la parte central del espectro de esa radiación, es sumamente nociva para los organismos. En los seres humanos, por ejemplo, pueden anular el sistema inmunitario, producir cataratas y favorecer la aparición de cáncer de piel. Además, a mediados de los años setenta, Robert C. Worrest, de la Universidad estatal de Oregón, había demostrado en el laboratorio que los rayos UV-B provocaban el desarrollo anómalo de los embriones de anfibio.

No abundaban, sin embargo, los experimentos realizados en la naturaleza para valorar las consecuencias de la radiación UV en los anfibios u otros animales. Por tanto, el grupo de Blaustein se propuso determinar si el nivel creciente de radiación UVB tenía algo que ver en el declive demográfico de los anfibios en su medio natural. Se formó para ello un equipo integrado por la ecóloga Susan C. Walls, los genéticos moleculares John B. Hays y Peter D. Hoffman, y los doctorandos D. Grant Hokit y Joseph M. Kiesecker, todos ellos de la Universidad estatal de Oregón.

El equipo centró su investigación en la influencia de las radiaciones en el ADN. Cuando éste absorbe energía de los rayos UV, se rompen los enlaces que mantienen unida la molécula y se forman nuevas estructuras. Los cambios operados en el ADN pueden arruinar el funcionamiento de las células e incluso provocar su muerte. Muchos organismos, no obstante, logran reparar las lesiones que los rayos UV causan en el ADN. En ese proceso, algunos de estos organismos (entre ellos ciertas especies de algas, plantas, peces, marsupiales y anfibios) activan una fotoliasa, enzima que elimina las estructuras nocivas.

Midieron la cantidad de fotoliasa producida en los huevos de varios anfibios; observaron que los niveles variaban de una especie a otra. Y, lo que encerraba mayor interés, comprobaron que las especies cuya población disminuía eran, por lo general, aquéllas cuyos huevos producían niveles bajos de fotoliasa y que, por tanto, estaban escasamente protegidos frente a la radiación ultravioleta.

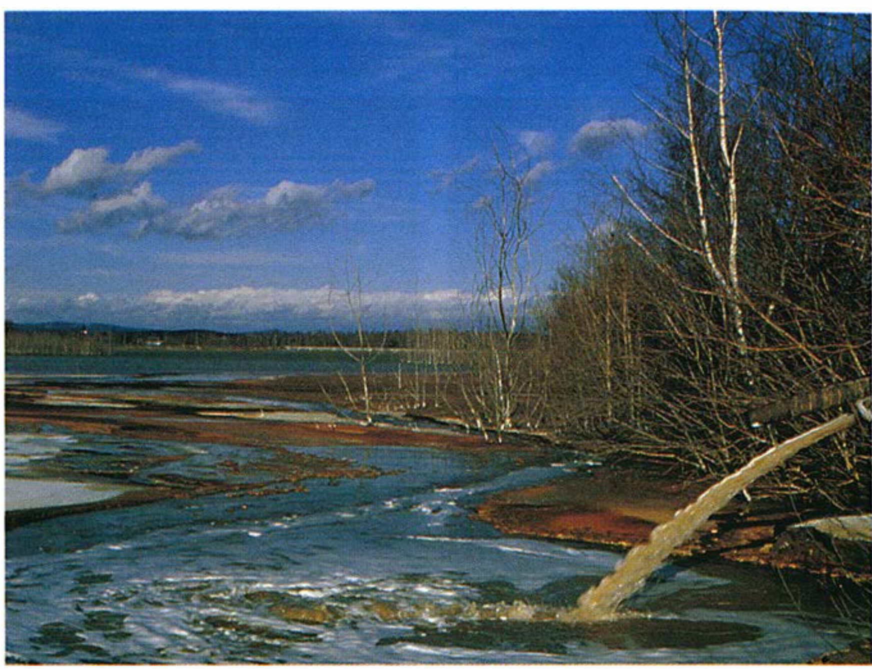
No decaía la población de la especie con mayor cantidad de fotoliasa, la rana arborícola del Pacífico *(Hyla regilla)*. La concentración de fotoliasa en los huevos de rana arborícola del Pacífico triplica casi la registrada en los de rana de las Cascades y sextuplica la de los huevos de sapo occidental. Según parece, los embriones de rana de las Cascades y sapo occidental producen, pues, niveles bajos de fotoliasa, insuficientes para contrarrestar la exposición a una cuantía insólitamente elevada de radiación ultravioleta. Esta falta de protección, a su vez, podría explicar la gran mortalidad observada entre los huevos, que convierte a ambas especies en firmes candidatas a la categoría de especies amenazadas en algunas zonas.

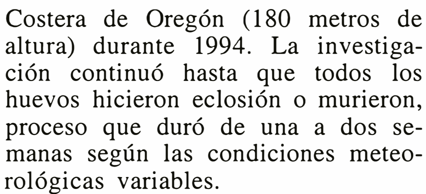
Una vez advertida la correlación entre desprotección ante la radiación ultravioleta y caída demográfica, el reto siguiente consistía en encontrar pruebas fehacientes de la culpabilidad de los rayos UV. Para ello, el equipo recolectó huevos de rana de las Cascades, sapo occidental, rana arborícola del Pacífico y salamandra noroccidental *(Ambystoma gracile)*, recién puestos. *A. gracile*, lo mismo que las tres especies restantes, pone sus huevos fecundados en aguas abiertas y someras; además, sintetiza niveles bajísimos de fotoliasa.

Colocaron los huevos en recintos apantallados. Cubrieron un tercio de los acuarios con plástico transparente (mylar) que protegía a los huevos de la radiacion UV-B. Un segundo grupo se dejaba al descubierto, de modo que los huevos quedaban desprotegidos. Taparon el tercio restante con acetato plástico transparente, que permitía el paso de las radiaciones. Este último grupo servía de control para asegurar que el resultado observado en los acuarios protegidos con mylar no se debía al hecho de estar cubiertos.

Dispusieron 48 acuarios de forma aleatoria alrededor de lagos y estanques en varios lugares diferentes, en los que las especies suelen poner sus huevos. Los experimentos con huevos de ranas y sapos se realizaron en la primavera de 1993 a altura superior a los 1200 metros, en la cordillera de las Cascades, en Oregón. Los experimentos con huevos de salamandra noroccidental se efectuaron en las laderas de la cordillera







causas propuestas son las enfermedades, como las infecciones por hongos *Saprolegnia* (*página anterior*), y el consumo humano de ancas de rana (*arriba*). A tales amenazas hemos de sumar la contaminación de los ríos y del aire (*derecha*).

Costera de Oregón (180 metros de altura) durante 1994. La investigación continuó hasta que todos los huevos hicieron eclosión o murieron, proceso que duró de una a dos semanas según las condiciones meteorológicas variables.

Si era cierto que la incapacidad para contrarrestar los daños infligidos por una exposición excesiva a la radiación UV destruía los huevos de muchas especies de anfibios, cabía esperar que a los productores de cantidades menores de fotoliasa les fuera peor que a los productores de cantidades elevadas. Los resultados de los experimentos de campo fueron espectaculares. Más del 90 % de los huevos de salamandra noroccidental expuestos a la radiación UV-B murieron, frente a sólo el 45 % de los huevos protegidos. Fallecieron, asimismo, más del 40 % de los huevos expuestos de sapo occidental y rana de las Cascades (frente al 10 % y el 20 %, respectivamente, de los huevos protegidos). En cambio, casi todos los huevos de rana arborícola del Pacífico eclosionaron con éxito en los tres grupos experimentales.

Resultaba evidente, pues, que los huevos de anfibios de las poblaciones naturales morían como consecuencia de la exposición a la radiación ultravioleta-B. Y este deterioro de los huevos contribuía probablemente al declive observado en el número de adultos. Aunque no sabemos aún si las salamandras noroccidentales están desapareciendo, a juzgar por estos experimentos es muy posible que también estos animales se hallen en peligro.

¿En virtud de qué mecanismo la radiación ultravioleta destruye huevos y embriones de anfibios? El grupo de Blaustein podría haber dado con una explicación parcial. Desde finales de los años ochenta, es cada vez mayor en Oregón el número de anfibios infectados por hongos del género *Saprolegnia*, que habita en lagos y estanques. Se sabe que el hongo infecta también a salmones y truchas de las piscifactorías. Es posible que la repoblación de algunos lagos con peces infectados por *Saprolegnia* haya podido contaminar los huevos de anfibios de esas aguas. Puesto que la radiación ultravioleta puede debilitar las defensas inmunitarias de muchos animales, parece razonable deducir que parte del daño observado en los anfibios se debe a un fiasco, inducido por la radiación UV, de la capacidad de los embriones de anfibios para resistir la infección por el hongo.

Además de dañar los huevos fecundados, la radiación ultravioleta puede contribuir a la caída de las poblaciones de anfibios por reducir la cantidad de insectos acuáticos de los que se alimentan. Está comprobado que los niveles elevados de radiación ultravioleta matan larvas de insectos y algas acuáticas.

Las investigaciones realizadas en Oregón han proporcionado una pista que pudiera ser importante en la resolución del misterio que rodea a la desaparición de los anfibios. Pero todavía quedan muchas cuestiones pendientes. ¿Cuántos huevos pueden dejar de eclosionar hasta que una población empiece a declinar? ¿Daña la radiación ultravioleta a los renacuajos en crecimiento, que se concentran en las aguas someras? ¿Se ven afectados directamente por la radiación UV los adultos que se asolean? En esos temas andamos ahora ocupados los firmantes de este artículo.

Por inquietante que sea el aumento de radiación ultravioleta, no constituye la única causa posible de declive de los anfibios. En la costarricense selva nebulosa de Monteverde y en las pluviselvas australianas, por ejemplo, los anfibios viven bajo un denso dosel arbóreo y esconden sus huevos. Pese a ello, muchas poblaciones están también allí decayendo.

Uno de nosotros (Wake) ha venido investigando las causas del declive de los anfibios desde los años setenta, cuando aparecieron las primeras señales de alarma. El asunto es realmente apremiante, pues aunque en varias zonas del mundo existen datos ciertos de la caída de las poblaciones, en otras los anfibios parecen encontrarse perfectamente. Esta desconcertante situación nos ha impulsado, como a otros investigadores, a reflexionar sobre las posibles razones del declive.

No existe una misma explicación que resulte válida para todos los casos. Las aducidas, sin embargo, parecen importantes, si bien en grado diverso. La destrucción y modificación de los hábitats constituyen, probablemente, los motivos principales de la caída demográfica de los anfibios. Igual que otros animales, también ellos se ven amenazados cuando se destruyen bosques o cuando se

Rana torrentícola hocicuda
(*Tautodactylus acutirostris*), Australia
Causa del declive desconocida





Rana montana patiamarilla
(*Rana muscosa*), California
Introducción de peces en su hábitat

Sapo común
(*Bufo bufo*), Europa
Causa del declive desconocida





Rana arlequín
(*Atelopus varius*), Costa Rica
Causa del declive desconocida

Salamandra tigre
(*Ambystoma tigrinum*), Norteamérica
Contaminación, lluvia ácida quizá



3. LAS ESPECIES DE ANFIBIOS que aquí se ilustran son algunas de las muchas cuyas poblaciones están declinando, si no se han extinguido ya. Las razones

rellenan y pavimentan humedales. Esas actividades provocan, verosímilmente, el declive de la mayoría de las especies amenazadas.

A este propósito, resulta llamativo un estudio reciente llevado a cabo en la zona occidental de Carolina del Norte. Se demostró que el desbroce de los bosques nacionales provoca, cada año, la muerte de gran cantidad de salamandras. Aunque la mayoría de las especies afectadas tienen una distribución geográfica bastante extensa y todavía no están en peligro de extinción, tales datos adquieren tintes preocupantes para los anfibios que viven en las áreas tropicales de América, Africa y Asia. Allí son más vulnerables por la limitación de sus áreas de distribución geográfica.

La contaminación, a su vez, podría estar incidiendo negativamente en la demografía de los anfibios en algunas zonas. Pero carecemos de datos suficientes sobre tales efectos. A tenor de ciertos indicios, la lluvia y la nieve ácidas, los fungicidas, herbicidas e insecticidas, así como otros productos químicos industriales, podrían perjudicar la reproducción y el desarrollo de los anfibios. Algunos compuestos sintéticos remedan la actividad de las hormonas naturales. Los estudios realizados con aves, peces y reptiles revelan que estas sustancias tienen en ocasiones consecuencias drásticas, como la reducción del número de espermatozoides o la alteración del aparato genital masculino.

Existen enfermedades, posiblemente asociadas a la contaminación ambiental, que parecen haber puesto en peligro a algunos anfibios. Hablábamos antes de la sensibilidad, de los huevos de rana de las Cascades y sapo occidental, a los hongos *Saprolegnia*, predisposición que aumenta probablemente con la exposición a un exceso de radiación ultravioleta. Según demostró Arthur N. Bragg, *Saprolegnia* puede destruir poblaciones enteras de renacuajos, aunque este descubrimiento apenas se haya considerado entre las causas de mortalidad en los anfibios.

Son contados los trabajos que, hasta la fecha, hayan asociado una enfermedad particular con la extinción de una población entera de anfibios. Se cree, no obstante, que la bacteria *Aeromonas hydrophila* podría haber sido responsable de la desaparición de varias poblaciones de sapos occidentales en Colorado. Se ha implicado también a esta bacteria, muy contagiosa, en la muerte de ranas, sapos y salamandras adultos en otros lugares.

Algunos atribuyen la caída demográfica a fluctuaciones naturales del tamaño de la población. Pero otras investigaciones, que cubren un intervalo dilatado, apuntan a una disminución más o menos uniforme en el número de anfibios a lo largo de los últimos 20 o 30 años, prueba de que, en determinadas poblaciones, operan otras fuerzas.

No acaban ahí las causas posibles para ciertos casos. El consumo humano podría estar agotando algunas poblaciones. En Francia, por ejemplo, la demanda de ancas de rana es altísima: entre 3000 y 4000 toneladas anuales (para obtener una tonelada de ancas han de sacrificarse 20.000 ranas). En las postrimerías del siglo XIX, las ranas patirrojas *(Rana aurora)*, capturadas de forma masiva para el consumo humano en Oregón y California, estuvieron al borde de la extinción.

Los propios esfuerzos realizados para aumentar el número de anfibios en la zona occidental de los Estados Unidos crearon quizá más problemas para las especies nativas de la región, y pusieron de manifiesto otra posible causa de decadencia: la introducción de especies foráneas. Para compensar el declive de ranas patirrojas, Oregón y California introdujeron la rana toro *(Rana catesbeiana)*. Este animal, de voraz apetito, competía con los anfibios nativos en su nuevo hábitat, o hacía presa en ellos. Al comprobar el crecimiento demográfico de la rana toro allí donde ha decaído la especie nativa, los biólogos comienzan a ver en aquél un motivo principal del descenso de algunas poblaciones de anfibios. Al menos dos estudios en curso establecen ya una directa relación causal entre la introducción de ranas toro y la disminución de especies de ranas nativas.

De modo similar, la introducción de peces en un ecosistema puede acarrear consecuencia negativas para los anfibios, sobre todo en regiones donde había pocas especies de peces, pocos individuos o ninguno. En las estribaciones meridionales de la cordillera de Sierra Nevada, en Califor-

Rana arborícola
(*Nyctimystes dayi*), Australia
Causa del declive desconocida



Sapo corredor
(*Bufo calamita*), Europa
Contaminación, en especial lluvia ácida



Sapo dorado (*Bufo periglenes*),
Costa Rica (posiblemente extinguido)
Causa del declive desconocida



de ese declive se están investigando. Quedan todavía muchos puntos obscuros. Para cada especie se indica la razón presumible de la amenaza.



Sapo occidental (*Bufo boreas*), Norteamérica. ***Enfermedad relacionada con la radiación ultravioleta***



Rana incubadora gástrica (*Rheobatrachus silus*), Australia (posiblemente extinguida)
Causa del declive desconocida

nia, la desaparición de las ranas montanas patiamarillas (*Rana muscosa*) se ha atribuido a la introducción de salmones y truchas en los ríos. Estas especies atentan directamente contra los anfibios, pues se alimentan de huevos, renacuajos e incluso ranas adultas. Pero tienen también un efecto más general y de mayor calado.

Muchas poblaciones de anfibios, pese a vivir separadas, están conectadas entre sí por cursos de agua recorridos por pocos peces, o ninguno. Estas conexiones revisten particular importancia porque los anfibios, extremadamente vulnerables a los cambios en su hábitat local, fían en que la aparición de migrantes ocasionales les ayude a recomponer las comunidades mermadas. La adición de nuevas especies de peces a una determinada zona puede bloquear la migración entre comunidades e impedir así la reconstitución de poblaciones amenazadas.

La desaparición de los anfibios representa algo más que la mera pérdida de animales atractivos desde el punto de vista estético o etológico. Componentes esenciales de muchas comunidades ecológicas, reportan beneficios directos a los seres humanos. En algunos ecosistemas, los anfibios son los vertebrados más abundantes, de modo que su ausencia puede desbaratar peligrosamente el funcionamiento del resto de la comunidad ecológica. Los adultos cazan mosquitos, moscas, peces, aves e incluso micromamíferos; las larvas, a su vez, sirven de alimento a insectos acuáticos, peces, aves y mamíferos. La desaparición de ranas, sapos y salamandras repercute, pues, en otros puntos de la cadena trófica.

Para el hombre, los anfibios representan un almacén de productos farmacéuticos que tiene todavía mucho que ofrecer. De su piel se han aislado centenares de secreciones químicas, cuya utilidad apenas se está empezando a descubrir. Algunos de estos compuestos se emplean ya como analgésicos y en el tratamiento de diversas afecciones, desde las quemaduras hasta el infarto de miocardio. Otros productos se están investigando por sus propiedades antibacterianas y antivíricas. La desaparición de los anfibios se lleva consigo posibles remedios para diversas enfermedades.

La comprobación de que el debilitamiento de la capa estratosférica de ozono atenta contra el desarrollo de los anfibios pone de manifiesto la complejidad de las fuerzas que intervienen en la extinción de las especies. No obstante, la degradación y destrucción del hábitat local siguen siendo la causa principal de desaparición de los anfibios en todo el mundo. Si la modificación del hábitat se produce lentamente (como ha ocurrido durante 3000 años en Europa occidental), los anfibios pueden adaptarse a los cambios, incluso a las alteraciones antropogénicas. Sin embargo, muchos de los cambios que hemos comentado, como el aumento de los niveles de radiación ultravioleta y la contaminación ambiental, se han producido con tal celeridad, que las especies con tiempos de generación largos no pueden adaptarse a ellos con suficiente rapidez.

El número de especies de anfibios supera de lejos la cifra de científicos dedicados a su estudio. De las especies conocidas, muchas sólo se han visto una vez, en el momento de su descubrimiento. El número de especies descritas continúa creciendo a un ritmo del 1-2 % anual. Si, como creemos, muchas de estas especies se hallan en peligro, un grupo de animales de extraordinaria diversidad está desapareciendo de nuestro planeta cuando apenas empezaban a despertar la atención de los investigadores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AMPHIBIAN DECLINES AND CLIMATE DISTURBANCE: THE CASE OF THE GOLDEN TOAD AND THE HARLEQUIN FROG. J. Alan Pounds y Martha L. Crump, en *Conservation Biology*, vol. 8, n.º 1, págs. 72-85; 1 de marzo de 1994.

PUTTING DECLINING AMPHIBIAN POPULATIONS IN PERSPECTIVE: NATURAL FLUCTUATIONS AND HUMAN IMPACTS. Joseph H. K. Pechmann y Henry M. Wilbur, en *Herpetologica*, vol 50, n.º 1, págs. 65-84; marzo, 1994.

UV REPAIR AND RESISTANCE TO SOLAR UV-B IN AMPHIBIAN EGGS: A LINK TO POPULATION DECLINES? Andrew R. Blaustein, Peter D. Hoffman, D. Grant Hokit, Joseph M. Kiesecker, Susan C. Walls y John B. Hays, en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volumen 91, n.º 5, páginas 1791-1795; 1 de marzo de 1994.

Los confines de la heliosfera

Cuatro viejas naves espaciales se precipitan hacia la frontera del sistema solar. No han de tardar en cruzar las últimas barreras que nos separan del espacio interestelar

J. R. Jokipii y Frank B. McDonald

Cometas y auroras nos recuerdan que, en el interior del sistema solar, el espacio no está vacío, sino repleto de partículas cargadas que emanan del Sol y fluyen velozmente, un continuo torrente de viento solar que, a menudo, sopla en ráfagas repentinas. El viento solar trasciende la órbita de la Tierra y las de los cometas. La cascada de partículas y el campo magnético solar que llevan consigo producen una cavidad esférica ingente en el medio interestelar, que sobrepasa la órbita de los planetas más distantes del sistema solar. Esta gigantesca región, una burbuja en la inmensidad del espacio donde domina el Sol, recibe el nombre de heliosfera.

Cabría imaginar que, conforme se alejara del Sol, la heliosfera iría desvaneciéndose poco a poco hasta convertirse en una frontera difusa donde las partículas del viento solar se mezclarían con la brisa interestelar de polvo y gas. No hay tal. Cerca del límite de la heliosfera exterior hay una discontinuidad brusca, donde se desarrollan, así se cree, múltiples fenómenos físicos intrigantes. Pero hasta ahora no se ha conseguido ninguna medida directa de los bordes exteriores de la heliosfera; por lo que se refiere a su naturaleza exacta, sólo podemos inferir, teorizar o especular. Ni siquiera sabemos a qué distancia del Sol se forma esta frontera. No obstante, nuestra ignorancia sobre los confines de la heliosfera podría durar tan sólo algunos años más, hasta que las sondas espaciales se abran paso a través de esa primera barrera del espacio interestelar.

Una flotilla de naves espaciales, lanzada hace unos 20 años, vuela en estos momentos más allá de las órbitas de Neptuno y Plutón. Sus trayectorias las llevarán a sobrepasar los límites del sistema solar. Forman esa modesta expedición *Pioneer 10* y *11* y *Voyager 1* y *2*. Si volviésemos la vista hacia el sistema solar desde cualquiera de estas naves, no habría objeto más brillante que el Sol, sólo que lo veríamos más de 1000 veces más débil desde la Tierra. Sin embargo, incluso a esas grandes distancias las cuatro naves espaciales siguen dentro de la heliosfera. Los instrumentos que llevan a bordo registran fenómenos originados en la superficie del Sol, desde la que se propagan hacia su exterior a unos 400 kilómetros por segundo. Pese a esta celerísima velocidad, las ráfagas tardarán meses en llegar a las sondas.

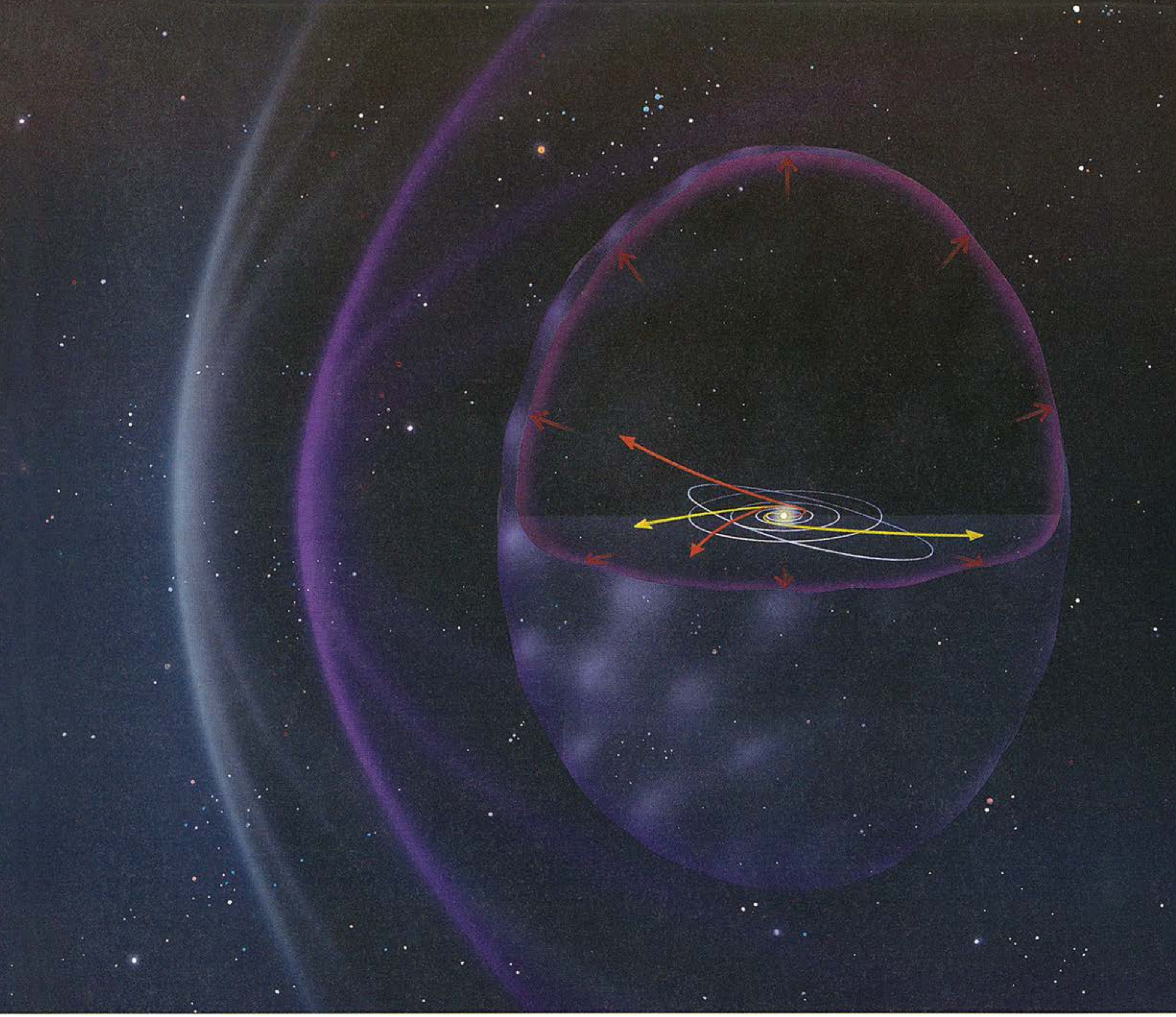
La misión original de las naves *Pioneer* y *Voyager* —el estudio de los planetas gigantes Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— es un triunfo perenne de la exploración espacial. Pero la vitalidad que aún les queda a estas cuatro sondas tras sus célebres visitas planetarias y el interés creciente por el comportamiento, dinámico y complejo, del viento solar lejano han hecho que se les encomiende una segunda: el estudio de las zonas remotas de la heliosfera y de su frontera con el medio interestelar. El éxito de esta nueva misión depende no sólo de la capacidad técnica de las naves y de sus controladores en tierra, sino también de la naturaleza de la heliosfera.

Eugene N. Parker dibujó, hace ya tres décadas, la estructura general del viento solar y de la heliosfera en una serie de artículos teóricos revolucionarios. Las observaciones han verificado la estructura que él predijo, al menos hasta donde ha llegado la nave espacial más adelantada, *Pioneer 10*. Ya hemos confirmado que el viento solar, con su movimiento radial desde el Sol hacia el exterior, lleva en sí la huella de la atmósfera solar: ciertas zonas del Sol emiten grandes corrientes de un viento muy veloz que fluyen cientos de kilómetros por segundo más deprisa que el viento típico. Si el Sol fuera estacionario, esas corrientes sólo formarían rayos lineales, pero como describe una rotación cada 27 días, las corrientes rápidas que se originan cerca del ecuador solar pueden llegar a sobrepasar a las más lentas que emanan de zonas adyacentes de la superficie. Esta configuración se mantiene a veces durante varias rotaciones solares, y da lugar a regiones del espacio donde la interfase entre las corrientes rápidas y lentas del plasma solar se torna espiral. Estas irregularidades giran con el Sol; de ahí su nombre: regiones interactivas en corrotación.

Además, algunas zonas de la atmósfera solar parecen eyectar soplos y ráfagas irregulares que viajan como perturbaciones transitorias del viento. De vez en cuando hay enormes erupciones en la superficie del Sol cuyas ondas expansivas desbaratan las corrientes más estables del viento solar.

Las interacciones del plasma del viento solar, numerosas y variadas, producen ondas de choque que calientan el viento y generan partículas de gran energía. Las regiones de interacción y corrotación, con las ondas de choque asociadas, caracterizan al viento solar hasta una distancia de más de 10 unidades astronómicas (una UA es el radio de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol, unos 150 millones de kilómetros). A partir de esa distancia las regiones de interacción se entremezclan; forman las regiones interactivas fusionadas globales, que pueblan el espacio hasta los más remotos confines de la heliosfera.

J. R. JOKIPII y FRANK B. MCDONALD se han dedicado durante años al estudio de las partículas energéticas de la heliosfera. Jokipii, que intervino en la misión *Ulises*, enseña astronomía en la Universidad de Arizona. McDonald, adscrito al Instituto de Ciencias Físicas y Tecnología de la Universidad de Maryland, ha participado en los experimentos sobre rayos cósmicos de las naves *Pioneer* y *Voyager*.



1. LA HELIOSFERA comprende la zona del espacio dominada por el viento solar. Cerca de sus márgenes exteriores, el plasma solar que fluye hacia fuera (*flechas rojas*) lo desvía el flujo del gas interestelar en la heliopausa (*violeta*), pero sólo tras su repentina ralentización en el frente esferoidal del choque terminal. Puede también que se forme una onda de choque arqueada (*blanco*) en el gas interestelar. Los datos de las sondas *Pioneer* (*flechas amarillas*) y *Voyager* (*flechas anaranjadas*) mejorarán nuestro conocimiento sobre las fronteras remotas de la heliosfera.

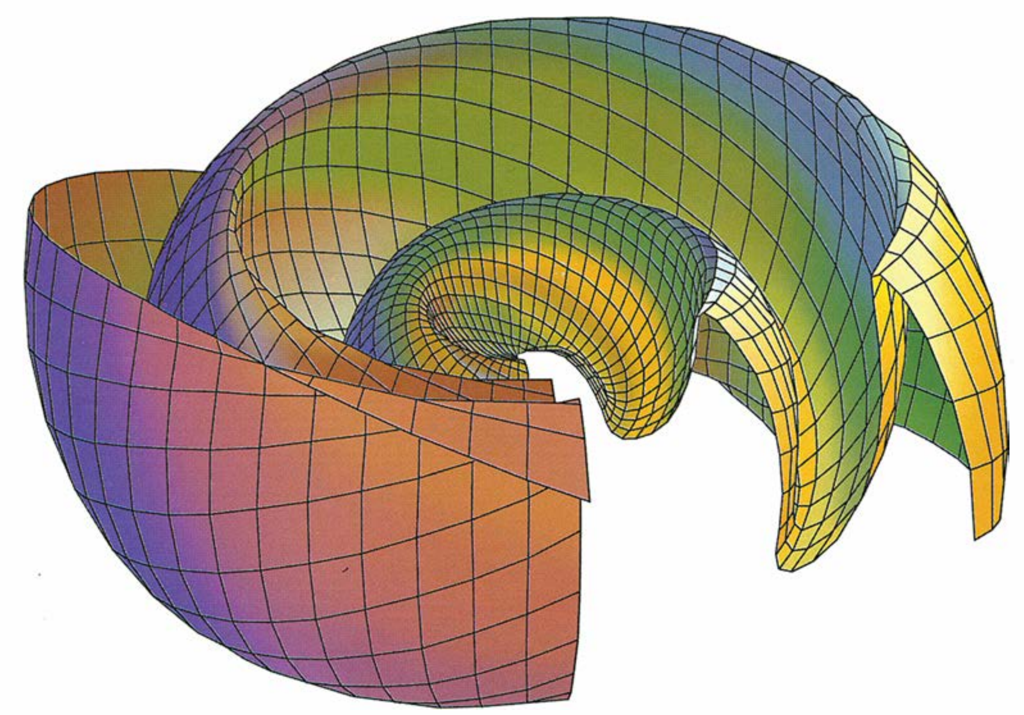
Hay, inmerso en la estructura torrencial de la heliosfera, un campo magnético interplanetario. La interacción entre el campo magnético y el viento solar puede ser muy complicada. Lo que no impide que podamos representar parte de su comportamiento mediante líneas de fuerza magnética y recurriendo a las propiedades que tales líneas confieren al viento solar en su proceso de expansión.

Visto con patrones terrestres, el plasma que constituye el viento solar podría parecer poco sustancial y amorfo. Pero el plasma es un excelente conductor de electricidad y la energía cinética del torrente es mucho mayor que la energía del campo magnético; por tanto, podemos abordar las líneas del campo magnético presentes en la heliosfera como si, efectivamente congeladas, fluyeran con el viento solar. Ese flujo magnético congelado le añade presión y viscosidad al tenue plasma. Estas propiedades se desarrollan a partir de las fuerzas magnéticas, y no gracias a las habituales interacciones moleculares que se dan en fluidos más densos. De lo que se infiere que la heliosfera contiene un entramado de líneas de campo magnético que el viento dilata de manera tal, que se forma un inmenso remolino espiral.

Las observaciones iniciales indicaron que las líneas de campo magnético alternaban una dirección centrípeta con otra centrífuga según fuese la longitud solar. En 1974, cuando el *Pioneer 11* desvió su trayectoria fuera del plano de la eclíptica valiéndose de la inmensa atracción gravitacional de Júpiter para intercambiar momento, se tuvo la primera oportunidad de medir el campo a una latitud heliográfica relativamente elevada. Fue una sorpresa (aunque lo había ya predicho Michael Schulz) que *Pioneer 11*

es capaz de empujar hacia fuera contra la pequeña presión que ejerce hacia dentro el medio interestelar. Llegado a este punto, el viento no decelera de modo paulatino; la razón es que su velocidad es mayor que la velocidad a la que se mueven en su interior las perturbaciones. El viento solar, pues, sufre un violento y repentino cambio de velocidad.

Este comportamiento es consecuencia de los fundamentos que rigen el flujo de los fluidos supersónicos. Para que el movimiento disminuya de forma gradual, el material que va en cabeza de la corriente tiene que dar una señal al fluido que aún está corriente arriba para que aminore su marcha. Estas señales han de transportarse en ondas de sonido que se desplacen por el medio. Pero unas ondas así no pueden propagarse contra fluidos que se mueven más velozmente que el sonido. Como resultado, el fluido que estaba corriente arriba choca con el que va por delante y se produce una conflagración: la onda de choque.



2. SE FORMA UNA LAMINA DE CORRIENTE NEUTRA en el viento solar bajo la influencia de los campos magnéticos que se dirigen en sentido contrario por encima y por debajo del ecuador magnético del Sol. Durante el ciclo solar, la inclinación del plano ecuatorial magnético cambia con el aumento y la disminución de la actividad solar. Esta inclinación, conjugada con la rotación del Sol, crea una geometría espiral (*ilustrada aquí de forma idealizada*) a medida que el viento solar transporta hacia fuera el campo magnético atrapado.

y *Voyager 1*, al llegar a la latitud heliográfica de 16 grados norte, descubrieran que el campo magnético se dirigía casi siempre hacia al exterior. Edward J. Smith dedujo que las naves espaciales estaban observando los campos magnéticos que había arrastrado el viento solar y que, a latitudes solares septentrionales, ese campo se orientaba en sentido opuesto al Sol.

Las misiones *Pioneer* y *Voyager* demostraron en 1976 que el campo magnético del Sol estaba organizado de tal modo que las líneas de campo del hemisferio norte generalmente apuntaban en dirección opuesta al Sol y las del hemisferio sur apuntaban hacia el astro. Por cambiar cada once años la polaridad del campo solar (coincidiendo con el máximo de las manchas solares), se produce un ciclo magnético de 22 años; así, *Pioneer 10* y *Voyager 1* detectaron, en 1986, que el campo norte apuntaba hacia dentro.

En la heliosfera, la transición entre los campos magnéticos dirigidos hacia el interior y el exterior adopta la forma de una superficie muy fina y combada que el viento solar arrastra hacia fuera, creando una gigantesca lámina interplanetaria de corriente. La rotación solar va deformando la lámina de suerte tal, que a lo largo de las líneas espirales del campo magnético se producen pliegues que giran con el Sol. Los campos magnéticos detectados por las sondas espaciales situadas cerca del plano ecuatorial solar se dirigen de forma alterna hacia dentro y hacia fuera conforme el giro de la lámina pasa ante ellas. La lámina se arruga menos durante los mínimos solares, períodos en los que se registran menos manchas solares y una actividad disminuida y que tienen lugar cada 11 años. Su geometría se vuelve tan intrincada durante los máximos solares, que la estructura laminar normal se hace totalmente irreconocible.

Sea cual sea la configuración del patrón de los campos magnéticos que se originan en la superficie del Sol, el viento solar lo arrastra hasta los lejanos bordes de la heliosfera en un año, aproximadamente. En ese intervalo, los torrentes de plasma más rápidos siguen mezclándose con los más lentos; brotan así regiones de mayor densidad de plasma e intensidad del campo magnético. La estructura a gran escala del viento solar y del campo magnético se mantiene casi intacta hasta una distancia muy grande, aún por determinar.

En su avance, el viento solar se expande hasta cubrir un volumen cada vez mayor. Al final, el plasma del viento solar se extiende hasta formar una capa tan fina, que ya no

Tal y como sucede con los accidentes de circulación en cadena, se espera que el choque terminal del viento solar sea irregular y turbulento. Cuando el gas del viento solar atraviesa el choque, su velocidad hacia fuera desciende hasta quedarse en la cuarta parte. La energía cinética del viento se convierte parcialmente en calor y hace que la temperatura del gas interestelar aumente a más de un millón de grados; otra parte se gasta en comprimir el campo magnético: la intensidad del campo cuadruplica el valor que posee dentro del choque. En esta frontera donde el viento solar cambia velocidad de salida por calor y turbulencia creemos, por tanto, que se encontrará un gigantesco frente de choque esferoidal de compleja estructura.

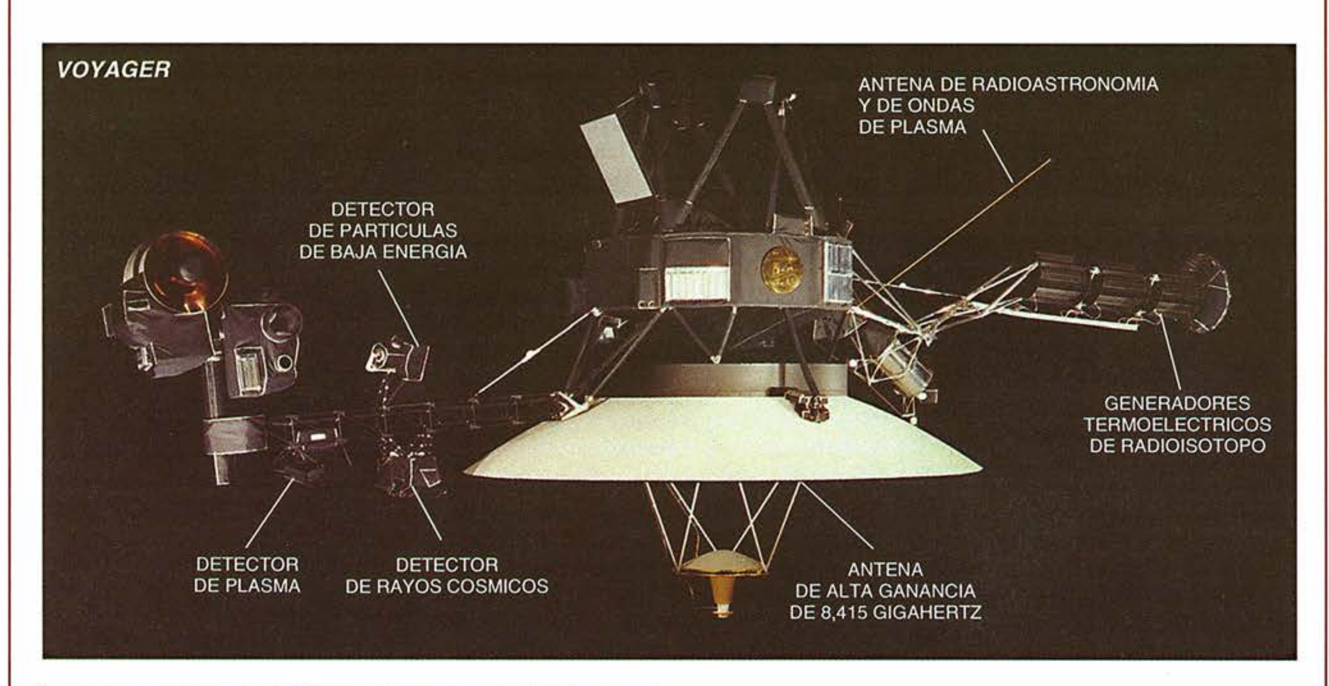
Antes de que las naves espaciales proporcionaran mediciones directas, había que basarse sobre todo en el estudio de los rayos cósmicos para deducir alguna información sobre la naturaleza de la heliosfera exterior. Los rayos cósmicos galácticos son partículas subatómicas (electrones, protones, todos los núcleos pesados desde el helio al uranio, positrones y un pequeño número de antiprotones) que viajan a prácticamente la velocidad de la luz y parecen poblar todas las zonas del universo. Su omnipresencia en el cosmos se deduce

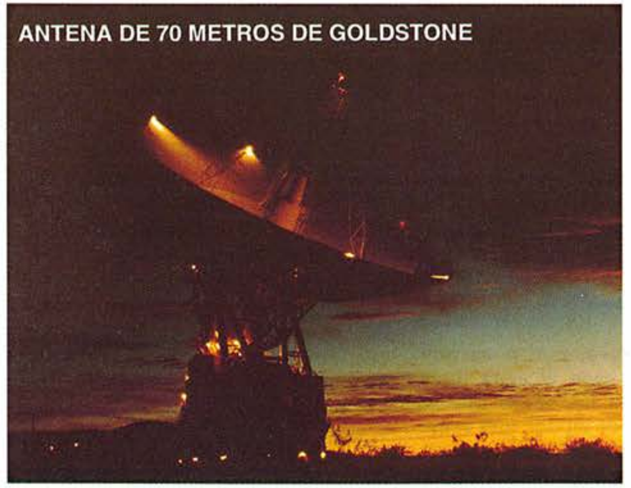
Sondas hechas para completar su misión

Las misiones al espacio lejano presentan a los diseñadores de los vehículos espaciales problemas técnicos en lo que se refiere al peso, las fuentes de energía y las comunicaciones. Las misiones *Pioneer* no sólo tenían que escapar de la gravedad de la Tierra sino que necesitaban además la suficiente energía para alcanzar Júpiter en dos años o incluso antes. La solución fue utilizar un cohete propulsor auxiliar de alta energía y conseguir que la nave fuera lo más ligera posible (en el lanzamiento, *Pioneer 10* sólo pesaba 250 kilogramos). También fue fundamental conseguir fuentes de electricidad fiables; lejos del Sol, las únicas fuentes viables son los generadores termoeléctricos de radioisótopos (GTR), que se valen de la desintegración del material radiactivo para producir electricidad a partir de calor. Cada nave *Pioneer* cuenta con cuatro unidades GTR, que al principio generaban un total de 155 watt. La longevidad de estas misiones dependerá de la desintegración radiactiva del combustible de óxido de plutonio y de la degradación de los elementos de conversión contenidos en las unidades GTR.

Las sondas *Voyager*, diseñadas a mediados de los setenta, aprovecharon las enseñanzas de las misiones *Pioneer* que las precedieron. Un vehículo lanzador más poderoso permitió la puesta en órbita de una nave espacial más pesada (825 kilogramos) y compleja. El diseño de los *Voyager* incluye una notable capacidad informática a bordo, una plataforma para experimentos orientable con precisión y unidades GTR mejoradas, que en el momento del lanzamiento producían 470 watt. La depuración y la flexibilidad del sistema de los *Voyager* han quedado demostradas por los considerables cambios de ingeniería que se le efectuaron en vuelo al *Voyager 2* de cara a su encuentro con Urano, programado con posterioridad al lanzamiento.

Las comunicaciones de las sondas *Pioneer* y *Voyager* precisan de una gran antena a bordo, su característica más visible. Las naves *Pioneer* llevan una antena parabólica de 2,7 metros, algo menores que las parabólicas de 3,7 metros de las naves *Voyager*. La antena de aquéllas gira alrededor del eje de la nave, que apunta constantemente hacia la Tierra gracias al uso ocasional de pequeños impulsores; las sondas *Voyager* no giran: sus tres ejes se mantienen estables, de modo que la antena de alta ganancia apunte hacia las antenas gigantes instaladas en la Tierra.



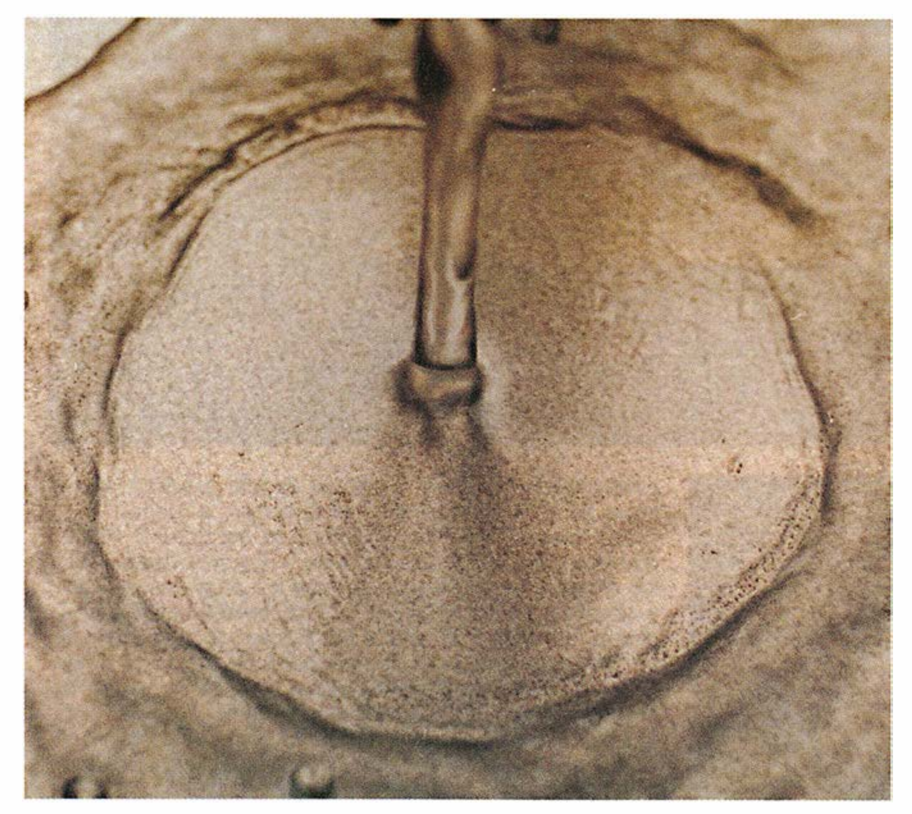


Los tres emplazamientos de la Red del Espacio Profundo de la NASA (California, Australia y España) figuran entre los elementos más importantes de los programas *Pioneer* y *Voyager*. En los veinte años transcurridos desde que se pusiera en marcha la misión del *Pioneer 10*, el Laboratorio de propulsión a Chorro de Pasadena ha mejorado el sistema de forma significativa gracias a la incorporación de nuevos receptores y al aumento del tamaño de las antenas. Pero tales mejoras no pueden compensar los insuficientes niveles de la señal debidos a la distancia creciente que nos separa de las cuatro naves. Con el fin de lograr una comunicación más fiable, se ha ralentizado el ritmo total de transmisión de datos del *Pioneer 10* al mínimo valor de 16 bits por segundo. La antena mayor del *Voyager* y su mayor frecuencia de transmisión hacen posible el uso de la antena de 34 metros de la Red del Espacio Profundo y permite la comunicación de 160 bits por segundo.

de la capacidad que tienen de producir rayos gamma de alta energía y ondas de radio (que se pueden detectar en la Tierra). En nuestra galaxia, los rayos cósmicos suelen originarse en aquellos lugares donde las ondas de choque remanentes de las explosiones de supernovas aceleran las partículas hasta darles grandes energías. También el Sol, durante los períodos de gran actividad, produce cantidades considerables de rayos "cósmicos" solares de energía menor.

Los rayos cósmicos galácticos bañan la heliosfera constantemente. Las partículas de los rayos cósmicos se difunden, en sentido opuesto al viento, contra el plasma solar debido a las altísimas velocidades que alcanzan y a la presencia de irregularidades en el campo. Las partículas, a causa de su carga eléctrica, dan unas vueltas muy ceñidas alrededor de las líneas del campo magnético, y como resultado también los rayos cósmicos tienden a viajar más allá de la heliosfera junto al flujo magnético congelado. En general, el viento modula la intensidad de los rayos cósmicos que caen en la Tierra al dificultarles el acceso a la heliosfera interior. Esta exclusión es más eficaz a bajas energías; los rayos cósmicos de mayor energía apenas si se ven afectados. Debido a que la fracción excluida varía según la actividad solar, la intensidad de los rayos cósmicos sigue el ciclo de 11 años característico de las manchas solares y muestra un máximo cuando la actividad solar registra un nivel mínimo.

Los rayos cósmicos galácticos atraviesan la heliosfera exterior, portando una información valiosísima sobre esta región inexplorada. Gran parte de nuestro conocimiento sobre los límites exteriores del sistema solar procede de la comparación entre modelos sobre el comportamiento de los rayos cósmicos a través de la heliosfera y datos de la observación. Las observaciones del espacio profundo realizadas por las cuatro sondas demuestran que el gradiente de rayos cósmicos —es decir, el ritmo al que aumenta la intensidad de los rayos cósmicos galácticos con la distancia heliocéntrica— es mucho menor de lo que se esperaba. Este descubrimiento indica que la heliosfera es mayor de lo que se predecía antes del lanzamiento de las naves *Pioneer* y *Voyager*.



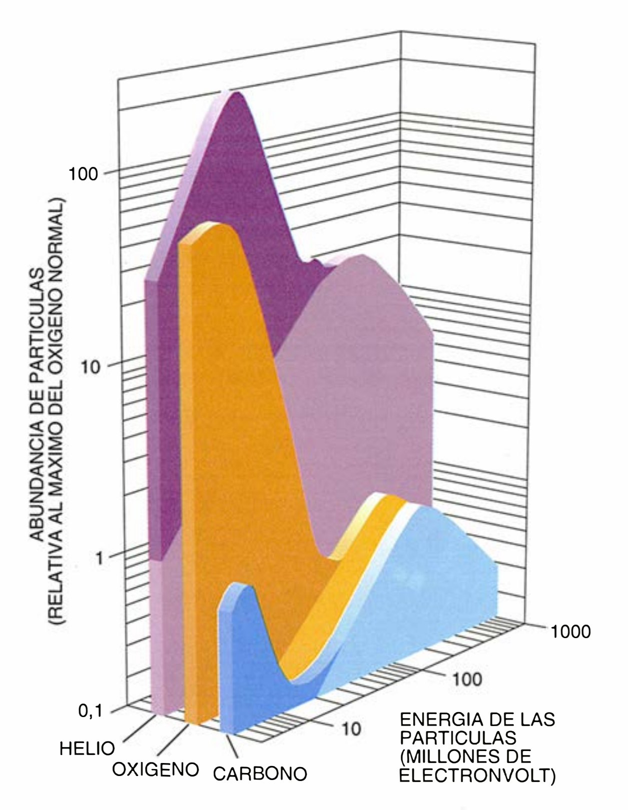
3. LOS CHOQUES TERMINALES no son exclusivos de la heliosfera; aquí se aprecia el que forma el agua que corre en un fregadero de cocina. Al caer, el agua fluye radialmente hacia fuera con celeridad mayor que la que llevan las ondas que se propagan por ella. En consecuencia, el fluido circundante no puede enviar una señal hacia la parte central indicando que su movimiento se ha ralentizado. Allí donde las partes rápidas y lentas del fluido colisionan bruscamente se crea un frente de choque. Es probable que el choque terminal que marca la frontera de la heliosfera sea irregular y turbulento como el que se produce en el agua.

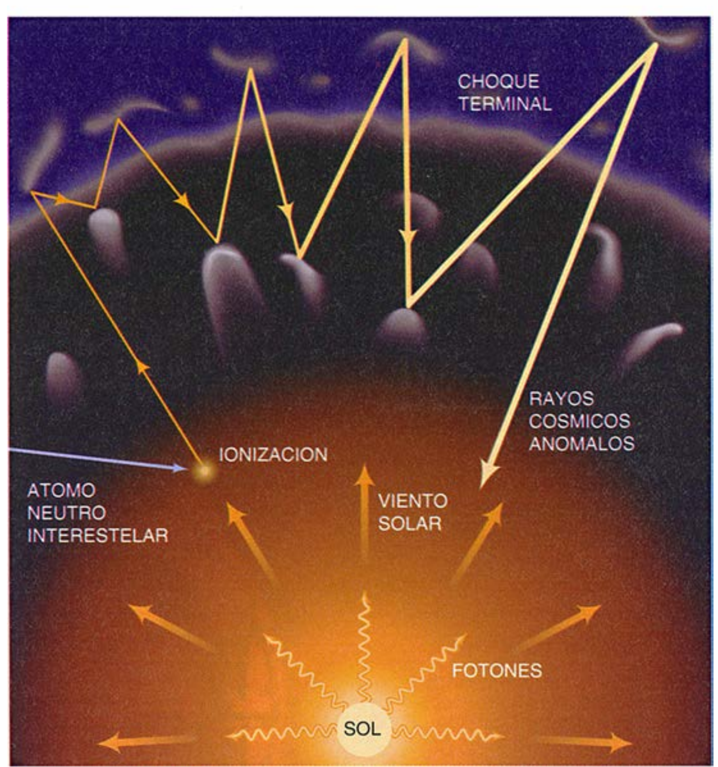
Al principio de los años setenta, los detectores instalados a bordo revelaron la existencia de un inesperado componente de baja energía en los rayos cósmicos. El estudio continuado ha demostrado un aumento, a bajas energías, de los rayos que se componen de núcleos de helio, nitrógeno, oxígeno, neón, argón y, más recientemente, de hidrógeno. Esta composición y este espectro de energía peculiares definen el componente anómalo de los rayos cósmicos. Las observaciones realizadas por las sondas *Pioneer* y *Voyager* han demostrado que la intensidad de los rayos cósmicos anómalos crece con la distancia del Sol.

¿Cuál es el origen de este misterioso componente de los rayos cósmicos? En 1974, Lennard A. Fisk, Benzion Kozlovsky y Reuven Ramaty sugirieron que el componente anómalo se origina en el espacio interestelar en forma de átomos neutros. A medida que la heliosfera se desplaza a través del gas interestelar, los átomos neutros, que no se ven afectados por los campos magnéticos ni por ninguna otra fuerza del plasma, fluyen libremente hacia la heliosfera interior. La radiación solar o el propio viento solar ionizan los que pasan cerca del Sol y los convierten en iones con una unidad de carga. Convertidos los átomos neutros en iones, las líneas de campo magnético del viento solar los atrapan y llevan hacia fuera. Fisk y sus colegas conjeturaron que una aceleración posterior a energías mayores transformaba los iones en rayos cósmicos anómalos.

La hipótesis se basaba en que la mayor parte del carbono del medio interestelar no podía intervenir en el proceso, por la sencilla razón de que en el espacio interestelar el carbono está ionizado casi por completo (lo que explica su escasa presencia en el componente anómalo). Observaciones recientes tomadas cerca de la Tierra por algunas misiones espaciales han demostrado que el oxígeno anómalo (y quizá también los otros componentes anormales) tiene una unidad de carga. Este resultado apoya el modelo de Fisk: es posible que los núcleos de los rayos cósmicos procedentes de una fuente cercana (dentro de la heliosfera) retengan algunos electrones, pero los rayos cósmicos normales los pierden todos a lo largo de su travesía por la galaxia.

Pero, ¿cómo se aceleraron estos iones recién formados hasta alcanzar las energías observadas de los rayos cósmicos? Durante los años setenta





4. LAS PARTICULAS DE LOS RAYOS COSMICOS suelen mostrar una distribución de energías que varía regularmente (*izquierda*), pero a bajas energías se detecta una extraña abundancia de ciertos núcleos (*sombreado oscuro*). Esta anomalía se debe a las partículas neutras que fluyen hacia la heliosfera, se ionizan y se transportan hacia fuera. Las partículas se aceleran hasta alcanzar energías superiores al dispersarse en las irregularidades magnéticas que hay a ambos lados del frente de choque (*derecha*). Las partículas aceleradas se desvían hacia dentro y se detectan como rayos cósmicos anómalos.

surgieron diversas propuestas. Ninguna acertó a predecir el aumento constante de la intensidad de los rayos cósmicos anómalos que registraron las sondas *Pioneer* y *Voyager* a medida que se adentraron en la heliosfera. En 1981, uno de nosotros (Jokipii), junto con Mark E. Pesses y David Eichler, apuntó que la aceleración de los iones con una unidad de carga acontecía en la frontera del choque terminal. Los choques de plasma son capaces de acelerar partículas cargadas, y ese lugar parecía un emplazamiento probable para la excitación de los rayos cósmicos anómalos, pues contiene el choque más intenso y duradero de toda la heliosfera. En modelos de ordenador se comprobó más tarde que la mayoría de las características de la componente anómala observadas se siguen de una forma natural a partir de esa idea.

Donald A. Gurnett y William S. Kurth han recogido indicios importantes sobre la naturaleza de la región terminal. Desde 1983 vienen registrando las erupciones de baja frecuencia de ruido en la zona de radio (entre dos y tres kilohertz) por medio de detectores instalados a bordo de los *Voyager*. Las señales persisten durante meses y luego se van desplazando gradualmente hacia frecuencias más altas. En 1992 observaron el inicio de un acontecimiento de radio particularmente intenso, y cayeron en la cuenta de que ocurrió más de 400 días después de un período de actividad solar insólitamente intenso. Esta secuencia seguía el mismo comportamiento de otra gran erupción de ruido producida en 1983. Estas notables señales de radio seguramente se originan al otro lado del choque terminal y, junto con los rayos cósmicos anómalos, proporcionan una información interesantísima sobre esta inmensa frontera.

A medida que las sondas espaciales *Pioneer* y *Voyager* se precipitan cada vez más lejos del Sol, aumenta la probabilidad de que se encuentren pronto con el choque terminal. Las estimaciones basadas en lo que antes se sabía del medio interestelar situaban la frontera del choque terminal en alguna parte distante entre 75 y 150 UA del Sol, pero los datos recogidos hasta ahora por las sondas apuntan a valores bastante inferiores. Es completamente posible, pues, que una o varias de las sondas lleguen al choque en los próximos diez años.

Los científicos de la NASA han dado una serie de pasos para asegurar que se realizarán las mediciones correctas durante el paso por el choque. Creen que se dispondrá de varias oportunidades para su observación; la turbulencia y las ráfagas del viento solar sacuden el choque terminal y hacen que se mueva hacia delante y atrás, así que la nave quizá lo cruce varias veces, una por cada vez que el choque la sobrepase hacia delante o hacia atrás en su vaivén. Cuando la nave supere definitivamente el choque, cesará el viento, y por vez primera un artefacto humano experimentará directamente los efectos del plasma interestelar. Puede que en ese momento se conozca la verdadera naturaleza del medio interestelar.

Tras haber informado de las condiciones físicas de la heliosfera exterior y, quizá, del choque terminal mismo, las cuatro naves continuarán su viaje hacia las estrellas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PHYSICS OF THE OUTER HELIOSPHERE. Dirigido por S. Grzedzielski y D. E. Page. Serie de Coloquios del COSPAR, vol. 1, Pergamon Press, 1990.

EXPLORING THE SUN. Karl Hufbauer. Johns Hopkins University Press, 1991.

SOLAR WIND SEVEN. Dirigido por E. Marsch y R. Schwenn. Serie de Coloquios del COSPAR, vol. 3. Pergamon Press, 1992.

Adiestramiento de las máquinas

El adiestramiento de una máquina se potencia notablemente aprovechando la información contenida en pistas y señales inteligentes

Yaser S. Abu-Mostafa

¿Por qué el elefante es grande, oscuro y de formas raras? Porque si fuera chico, blanco y redondo, sería una tableta de aspirina. Ese es un chiste viejo. Lo nuevo es que podría constituir un eslabón del proceso de identificación por ordenador de elefantes y aspirinas. Las máquinas no poseen, como nosotros, conocimientos innatos; hay que desmenuzárselos con minuciosa precisión. No es tan fácil que una máquina aprenda.

Con todo, el aprendizaje de las máquinas se desarrolla con enorme rapidez. En los últimos años asistimos a una explosión de aplicaciones, desde la lectura de códigos postales hasta la predicción de plazas en las compañías aéreas. Y es casi seguro que la tarjeta de crédito que expide un banco ha sido autorizada por una máquina que aprendió por sí misma a evaluar los riesgos.

Diseñar un programa de ordenador que permita acometer determinado trabajo exige comprender hasta el fondo esa tarea y su resultado correcto. De ahí el interés fundamental de enseñar a la máquina. En lugar de concebir un programa especializado, nos limitaríamos a proporcionar ejemplos instructivos a una máquina versátil que aprendería por su cuenta.

Como ejemplo, un sistema para la aprobación de tarjetas de crédito se valdría de datos históricos sobre clientes "buenos" y "malos" para discriminar a los solicitantes. A la máquina no le importan los detalles del problema, sólo tiene que tomar pares de entradas (en este caso, información personal) y salidas (vicisitudes del crédito) que se correspondan, y absorber toda la información que contenga esa relación. La máquina adiestrada sirve luego para evaluar nuevas peticiones. Este género de procedimiento va un paso más allá de lo que normalmente se acostumbra. No sólo aplica el ordenador a una tarea repetitiva, sino que automatiza el propio diseño de un sistema que realice la tarea.

En principio, la metodología de aprendizaje de la máquina es aplicable a un gran conglomerado de problemas. Pero si los ejemplos de entrada-salida carecen de información vital, la máquina tal vez nunca adquiera destreza. Por suerte, muchas veces se le puede agregar la información necesaria en forma de pista inteligente. En el aprendizaje de máquinas se utilizan como pistas desde meras observaciones a conocimientos muy refinados.

En las aplicaciones de visión por ordenador para el reconocimiento de objetos existen numerosas pistas de invariancia: un objeto sigue siendo el mismo aunque su posición dentro del campo visual varíe o cambie de tamaño. En el ámbito financiero y de mercados, abundan las pistas de monotonicidad, es decir, si una entrada se desplaza persistentemente en un sentido o dirección, la salida debe también mantener esa dirección de movimiento. Cada aplicación cuenta con pistas propias que ayudan al proceso de aprendizaje.

Si una aplicación se conoce en grado suficiente para ofrecer pistas, ¿por qué empeñarse en que la máquina ante todo aprenda? ¿Por qué no emplear dicho conocimiento en el diseño de una máquina especializada en ese trabajo? Podría hacerse así en algunos casos, pero lo normal es que no se domine el problema, ni, por tanto, se pueda especificar un método de resolución siguiendo reglas bien definidas.

Entre los dos extremos —problemas estructurados que están totalmente definidos y no requieren ejemplos, y casos erráticos, sin definición alguna, cuya solución depende enteramente de ejemplos de entrenamiento— se abre un vasto dominio intermedio para las máquinas que aprenden a través de pistas inteligentes.

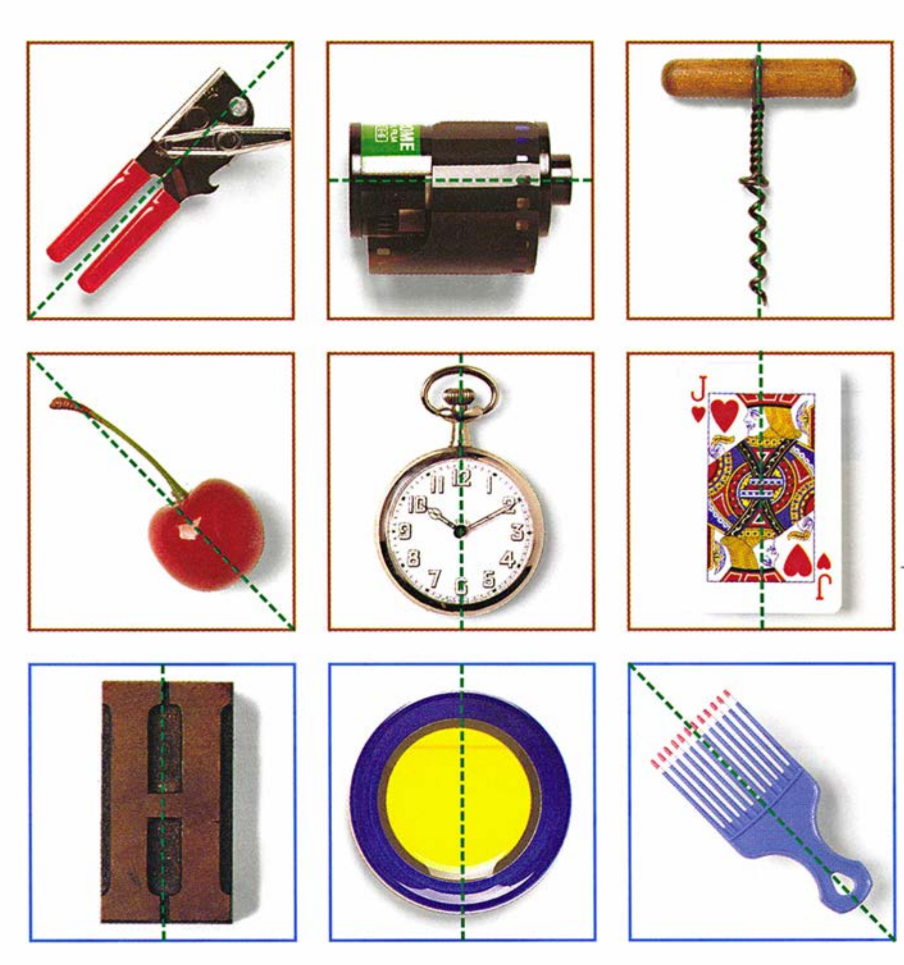
¿Cómo aprenden las máquinas? Se han ideado numerosos modelos para tal adiestramiento. El que vaya a aplicarse tendrá una estructura general adaptada a grandes rasgos al problema, pero también dispondrá de parámetros con muchos grados de libertad —comparables a los mandos y controles que ajustan una máquina. Los valores dados a dichos controles determinarán cuál será el comportamiento que la máquina terminará por adoptar; según sea la opción escogida, así será el resultado final.

En términos matemáticos, el comportamiento de la máquina puede verse como una función que asocia valores de entrada (específicos del problema a resolver) con valores de salida (decisión o acción requerida). La meta del aprendizaje de la máquina es llegar a emular la función objeto: establecer la cartografía deseada entre entradas y salidas. Podemos tomar ejemplos instructivos de la función objeto que guíen la selección de valores para los parámetros libres de la máquina. A cada nuevo ejemplo, la máquina refina sus posiciones internas de suerte que las entradas y salidas concuerden como es debido. Y cuando alcanza un estado que se aproxima en el mayor grado posible a la función objeto, decimos que la máquina ha "aprendido" dicha función. El aprendizaje no es más que la búsqueda de las posiciones

YASER S. ABU-MOSTAFA enseña ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en el Instituto de Tecnología de California (Cal Tech), donde dirige el grupo de sistemas expertos. Se formó en la Universidad de El Cairo y en el Politécnico de Georgia. Uno de los investigadores más sobresalientes en ingeniería de sistemas neuromórficos, ha publicado numerosos trabajos sobre teoría del aprendizaje, redes neuronales, reconocimiento de patrones, teoría de la información y complejidad de la computación.

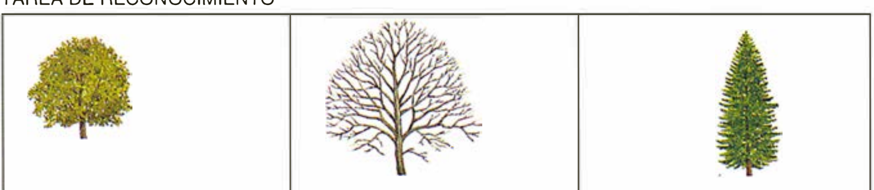


1. ¿SABE USTED QUE CARACTERISTICA DISTINGUE a estos dos grupos de objetos, los de recuadro azul y los de recuadro marrón? De ese tenor son las preguntas que se plantean a los ordenadores programados para aprender por ejemplos, y que se responden con mayor facilidad y rapidez aportando alguna pista. En este caso, la encontrará pasando la página.

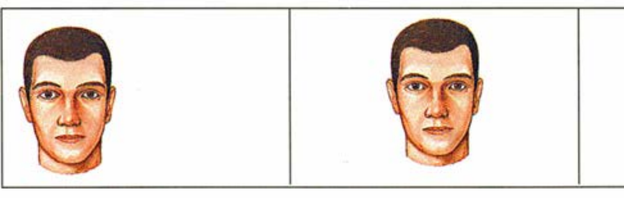


2. UNA PISTA VISUAL ayuda a encontrar la respuesta. Trazando los ejes señalados, se aprecia claramente que los seis objetos superiores carecen de simetría, propiedad que sí exhiben los tres de abajo. Esto diferencia las categorías de recuadros marrones y azules.

TAREA DE RECONOCIMIENTO

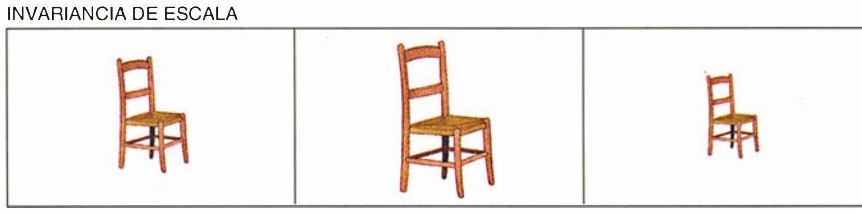


INVARIANCIA DE TRASLACION





INVARIANCIA DE ESCALA



3. LAS PISTAS DE INVARIANCIA ayudan a las máquinas a reconocer objetos que no pierden su identidad aunque se miren de otra manera. Una máquina que identifica árboles no sabe de antemano que ni su tamaño ni su posición importan. En cambio, adiestrada en ejemplos "virtuales" de objetos muy diferentes —un rostro o una silla—, podría asimilar estos principios.

correctas de los mandos; al ser guiado por ejemplos instructivos, este paradigma recibe la denominación de aprendizaje por ejemplos.

La aplicación más extendida de ese adiestramiento mecánico la tenemos en las redes neuronales, que se inspiraron en la potencia de los sistemas neurobiológicos reales. Se componen de gran cantidad de elementos de computación interconectados de tal modo que la salida de cada uno de ellos refleja las entradas que le llegan de varios otros. Los parámetros ajustables de la red neuronal son los pesos sinápticos, así llamados por semejanza con las sinapsis entre células nerviosas.

Por su flexibilidad y sencillez de entrenamiento, las redes neuronales han sido el modelo selecto de máquina autodidacta en los últimos 10 años; ahora encuentran aplicación en una amplia gama de procesos de aprendizaje de máquinas. Si bien se han construido redes electrónicas e incluso ópticas especializadas, en la mayoría de los casos una red neuronal se materializa en un programa que se ejecuta en un ordenador o estación de trabajo personal.

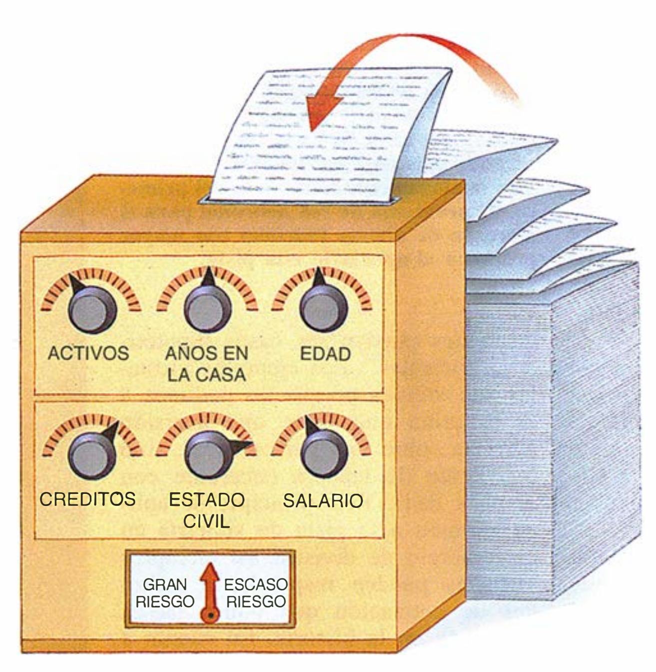
Dada la extensión del entrenamiento requerido, podríamos pensar en largas y aburridas sesiones junto al ordenador, supervisando todo el proceso de aprendizaje. Afortunadamente, la responsabilidad de hallar los ajustes óptimos suele recaer sobre un algoritmo de aprendizaje, método que reduce el proceso a una serie de pasos sencillos e iterativos, que el ordenador puede ejecutar por separado. Uno de los sistemas de aprendizaje más comunes de hoy es el algoritmo de retropropagación para entrenamiento de redes neuronales, popularizado por David E. Rumelhart.

Mediante cálculos sencillos, la retropropagación decide cómo han de modificarse los parámetros de la red neuronal. Para entrenamiento toma un ejemplo —una entrada y su salida correspondiente— e introduce pequeñas variaciones en los parámetros de la red para reducir al mínimo la diferencia entre la respuesta actual de la red y la respuesta buscada. Repite una y otra vez esta operación, acercando paulatinamente la red al efecto deseado. Tras un barrido reiterado de todos los ejemplos, la red puede ofrecer una réplica muy razonable de la función objeto.

Veamos bajo esta óptica la aprobación de tarjetas de crédito. Como ejemplo de entrada-salida tendríamos los datos que presenta el solicitante (edad, salario, estado civil) y el comportamiento final de su crédito

(beneficio o pérdida para el banco expedidor). Una red neuronal para autorizar tarjetas de crédito podría, en teoría, predecir la conducta de una persona sin más que examinar los datos que ella aporta. Para aprender esta función, la red toma miles de solicitudes de personas reales junto con los resultados de los créditos y modifica sin cesar sus parámetros internos hasta lograr una salida que concuerde con esos registros históricos.

Hay parámetros variables que pueden tener relación con el salario y actuar sobre la red en el sentido de admitir a la gente de mayores ingresos. Otros, referirse a la edad y al estado civil, favoreciendo combinaciones particulares de estos atributos. Por último se alcanza un estado en el cual la red produce la respuesta correcta con tantos ejemplos de entrenamiento como sea posible. La red puede ahora valorar una nueva solicitud extrapolando su "experiencia" para predecir cómo va a comportarse el nuevo cliente con el crédito.



4. UNA MAQUINA APRENDE ajustando los parámetros internos de modo que a ciertas entradas de datos correspondan las salidas deseadas. Así, al sistema de aprobación de créditos se le adiestra para asociar los datos personales del solicitante con su comportamiento frente al crédito. El proceso de aprendizaje "sintoniza los mandos" hasta que la máquina pueda repetir las relaciones entrada-salida dadas en los ejemplos de entrenamiento.

Realizados en forma de red neuronal o de cualquier otra manera, todos los métodos de aprendizaje de máquinas comparten la premisa fundamental de aprender a través de ejemplos. Para que el aprendizaje tenga éxito, la máquina debe ser capaz de generalizar a partir del limitado número de muestras entrada-salida de adiestramiento. Pero quizá los ejemplos presentados no encierren suficiente información para que la máquina responda correctamente a nuevas condiciones de entrada. El buen comportamiento ante esos ejemplos no implica que la reacción tenga que ser tan satisfactoria ante eventos que la máquina nunca ha tratado.

Recuérdese que la máquina lo ignora todo acerca de la función que intenta aprender, a excepción de lo que percibe en los datos de entrenamiento. Si éstos son deficientes —demasiado escasos los ejemplos o un exceso de información irrelevante dentro de los mismos— la máquina no generalizará correctamente. Quizá tampoco incluyan los ejemplos toda la información importante. Sea el caso de enseñar a reconocer árboles a un sistema de visión mecánico. Si no es posible identificar un árbol en términos matemáticos precisos, no se podrán dar a la máquina reglas estrictas que estructuren el problema. Entonces, cuando mostramos a la máquina imágenes de árboles y otros objetos distintos, se le aporta información, pero todavía queda mucho por enseñarle. Por ejemplo, sabemos que el árbol sigue siendo árbol aunque se desplace o se transforme de escala; para nosotros esto es intuitivo, pero la máquina no lo sabe a menos que se le comunique específicamente. Sin darle pista alguna, la máquina necesitaría un tiempo larguísimo para llegar a "entender" esto, si es que lo lograba.

Hasta el indicio más elemental puede afianzar el aprendizaje. Como en un juego de preguntas y respuestas donde cada vez se afina más la búsqueda, unas cuantas pistas pueden marcar la diferencia entre aprender una función y no aprenderla en absoluto. Por ello introdujimos un formalismo, llamado aprendizaje por pistas, hace unos seis años, que desde entonces se ha incorporado en muchos sistemas de aprendizaje. Sus éxitos más notables se han dado en los sistemas de transacciones para mercados financieros y de reconocimiento de caracteres manuscritos.

Una pista inteligente ayudará también a resolver una solicitud de tarjeta de crédito. No es fácil definir con precisión qué cualidades determinan la fiabilidad del sujeto en este terreno, pero hay una pista obvia: si dos personas idénticas en todo menos en el salario piden un crédito, y la máquina lo ha aprobado para el de salario más bajo, también deberá aprobarlo para el que gana más dinero. Esta es una de las numerosas pistas de monotonicidad posibles. Mientras la máquina aprende, debe ajustar sus parámetros libres de manera que concuerden las entradas y salidas con arreglo a la función objeto, acomodándose al mismo tiempo a las pistas aportadas.

Una interesante y lograda aplicación del aprendizaje por pistas fue en el comercio exterior en divisas. Mis colegas y yo instruimos a la máquina a predecir los tipos de cambio del dólar estadounidense frente a otras cuatro importantes monedas. Queríamos comprobar si el sistema de transacción resultante sería más ventajoso cuando se aportaran pistas sensatas al proceso de aprendizaje. La que utilizamos se caracterizaba por una simetría a nuestro entender obvia: si un determinado patrón en la historia de las cotizaciones implica un desplazamiento (al alza o la baja) de la moneda de EE.UU. frente a otra moneda, ésta deberá variar en el mismo sentido si aparece idéntico patrón en su historia de cotizaciones. En los cuatro mercados analizados, la pista de simetría aportó al sistema un aumento de beneficios de manera estable.

Para cerciorarnos de que la mejora de nuestro programa de red neuronal procedía de la información contenida en la simetría, intentamos confundir a la máquina de dos maneras. Primeramente le dimos una pista de valor nulo, compuesta por fragmentos de información aleatorios, viendo con satisfacción que la máquina no progresaba y se comportaba más o menos como cuando no se le daban pistas. A continuación, introdujimos una pista con información deliberadamente errónea: el comportamiento se deterioró entonces rápidamente, como era de esperar. La pista inteligente había servido para algo.

Utilizar pistas en el aprendizaje de las máquinas afronta un reto primordial: automatizar el proceso. Las pistas vienen bajo diversos disfraces, y su fuerza va desde la insinuación sutil a la deslumbrante evidencia. El

problema es encontrar un algoritmo que estructure el aprendizaje a partir de los variados fragmentos de información aportados.

En primer lugar, hay que normalizar las representaciones de pistas para que el algoritmo de aprendizaje pueda tratarlas de igual manera. La clave para conseguirlo se encuentra en la representación de la propia función objeto: los ejemplos entrada-salida. La identidad de estos ejemplos de entrada-salida distingue una función objeto de otra. De modo análogo, si pudiéramos representar cada una de las pistas deseadas por un conjunto de ejemplos, ya no importaría la clase de pista que se quiera introducir.

Para representar la pista de monotonicidad en la aprobación de tarjetas de crédito, podrían servir de ejemplo dos personas con datos idénticos, salvo en el salario. Cuando la máquina recibe las solicitudes de ambos, puede actuar de acuerdo con la pista (aprobando o negando el crédito a los dos, o aprobando solamente el de salario más alto), o por el contrario puede discrepar de ella (aprobando solamente el de menor salario). El algoritmo de aprendizaje podrá entonces ajustar los parámetros de la máquina para satisfacer esta pista, exactamente como si se estuviera incorporando un ejemplo más de la función objeto. Con ello se presta un eficaz respaldo a otros mecanismos de aprendizaje.

No es preciso que los ejemplos representativos de la pista sean reales. Los dos solicitantes con salarios diferentes pueden ser casos hipotéticos, "virtuales". Los ejemplos virtuales son válidos porque no pedimos a la máquina que tome una decisión correcta sobre una persona real, sino que actúe de manera coherente con la pista dada. Este principio se aplica también a la pista de simetría en el comercio de divisas; los ejemplos virtuales pueden responder a patrones de cotización que nunca hayan aparecido en la historia. En cuanto a la visión por ordenador, podemos representar las pistas de invariancia mediante imágenes cuyo contenido no tenga nada que ver con la función objeto real. El adiestramiento para este tipo de pista no exige que la máquina dé una salida de "verdadero" o "falso", sino únicamente que mantenga una salida uniforme cuando el patrón de entrada sufra una traslación o varíe de tamaño.

Los ejemplos virtuales son de enorme importancia en muchas aplicaciones ya que pueden añadir información sustancial a grupos muy poco nutridos de ejemplos reales. Así, en la predicción de cambios de divisas, sólo disponemos de un pequeño conjunto de patrones recientes. La posibilidad de suplementar datos históricos aislados con ejemplos virtuales encierra, pues, gran valor. Sólo falta encontrar un algoritmo de aprendizaje que consiga un correcto equilibrio entre las pistas y los ejemplos reales de entrada-salida.

El algoritmo de aprendizaje tratará de ajustar los parámetros de la máquina para que a la vez concuerden con el conjunto de adiestramiento completo y con todos los ejemplos de cada pista. Como una solución perfecta suele ser imposible, se ha



5. LOS CAMBIOS DE DIVISAS se controlan mejor mediante pistas de simetría: si una divisa nacional sube con respecto a la de otro país al darse ciertas condiciones en su historial, cuando la del segundo país pase por igual situación subirá análogamente frente a la del primero. El programa de red neuronal para el mercado de divisas funcionó con mayor provecho al aportarle esta pista.

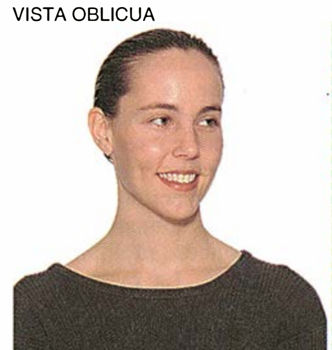




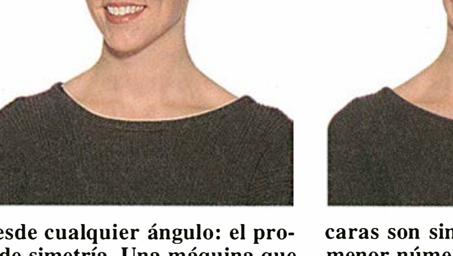








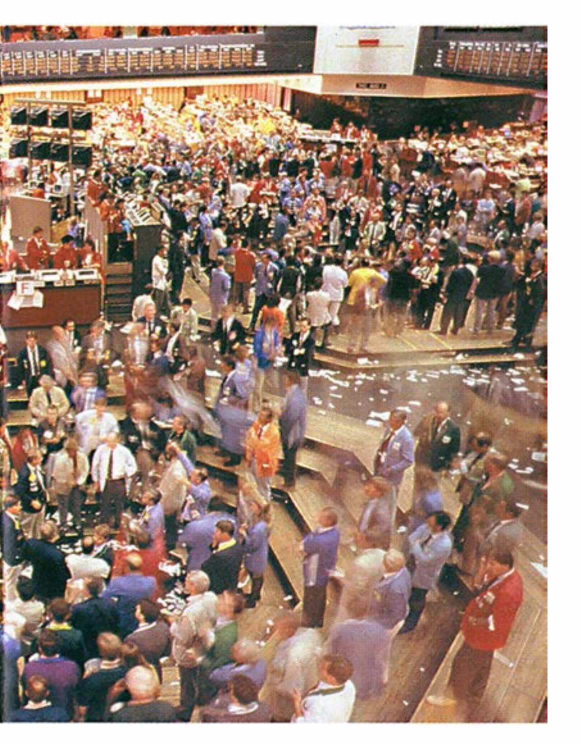


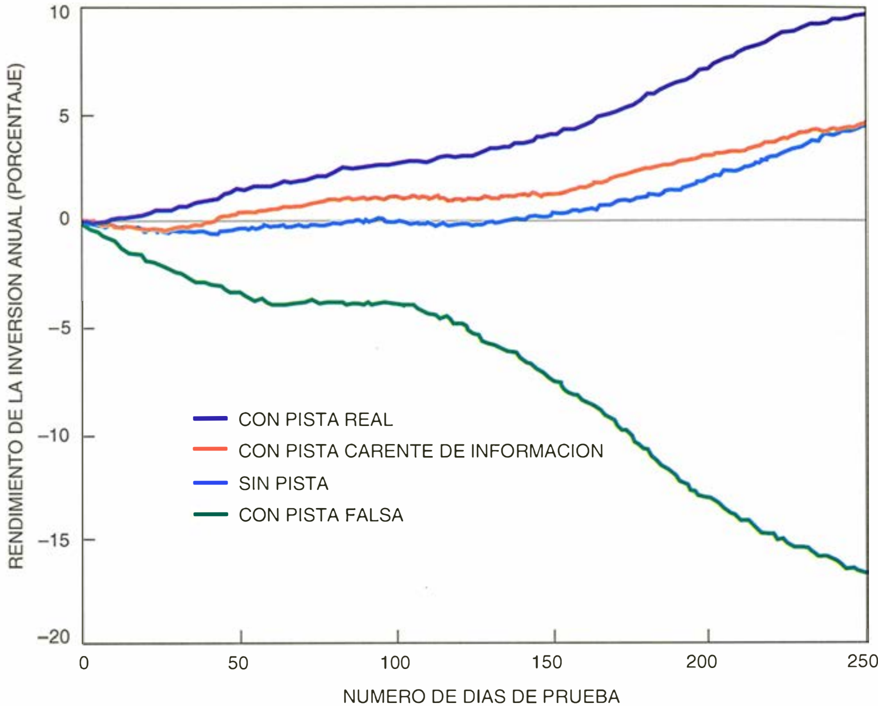






6. RECONOCER UN ROSTRO desde cualquier ángulo: el proceso se facilita siguiendo una pista de simetría. Una máquina que no sepa nada de rostros humanos necesitaría muchas perspectivas para hacerse con esta tarea (*arriba*). Conociendo que las caras son simétricas (*abajo*) puede generalizarse a partir de un menor número de ángulos. Los animales podrían apoyarse en el conocimiento instintivo de semejante indicación; un mono reconoce mejor una cara si la memoriza desde una visión oblicua.





de alcanzar cierto compromiso. Para ello, la máquina necesita evaluar el grado de concordancia logrado en cada etapa. A lo largo del adiestramiento se aprenden mejor unas pistas que otras; si el ordenador puede determinar cuál es la que se ha aprendido peor, podrá prestarle mayor atención en la siguiente iteración. Sobre este concepto se basa el algoritmo de "mínimo adaptativo", desarrollado por el autor, el cual programa diferentes pistas para el aprendizaje de tal modo que se consiga el equilibrio entre las mismas y el conjunto de entrenamiento.

Mi algoritmo es "adaptativo" en el sentido de que evalúa continuamente la acomodación de la máquina tanto a las pistas como a los ejemplos de adiestramiento, y modifica en consecuencia los parámetros ajustables. Se le llama "de mínimo" porque el algoritmo intenta reducir al mínimo la medida cuantitativa del error (diferencia) existente entre las acciones actuales de la máquina y el comportamiento final que se espera de ella.

Debo reconocer que, pese a que muchas de estas ideas ya rondaban por mi cabeza, mi primer éxito le debe más a la necesidad que a la inspiración. Tenía que presentar la teoría de las pistas de aprendizaje en cierta reunión científica, y el día anterior reparé en que se me habían asignado 10 minutos más del tiempo que yo había previsto. Pensando que iba a decepcionar a los asistentes con una conferencia demasiado breve, intenté durante toda una noche desarrollar la parte que se refería al algoritmo. Así nació la idea básica del algoritmo de mínimo adaptativo; al día siguiente lo expuse y afortunadamente fue bien acogido.

Todavía se alzan muchos obstáculos en las técnicas de aprendizaje de máquinas. Quizá los fallos más graves provengan de la tendencia de las máquinas a "sobreaprender" a partir de ejemplos de adiestramiento, lo que puede comprometer su capacidad de operación correcta. El sobreaprendizaje sucede cuando la máquina memoriza ejemplos de entrenamiento a expensas de la generalización. Viene a ser algo así como la del turista que visita las pirámides de Egipto; los guías locales explican con todo lujo de detalles y en perfecto inglés los monumentos, e incluso contestan preguntas corrientes sobre los faraones, pero si uno se anima e intenta seguir preguntando, descubre que no entienden ni hablan inglés. Han memorizado las frases necesarias para la visita turística, pero no han "generalizado" en absoluto. El aprendizaje de la máquina puede correr la misma suerte.

Otro escollo común en problemas de aprendizaje más complejos es la necesidad de un tiempo de computación excesivo. Al buscar el algoritmo de aprendizaje, los valores óptimos de los parámetros libres (lo que se llama el óptimo global), a veces queda atrapado en una configuración de menor calidad (un óptimo local), la cual aventaja a otras soluciones similares, pero todavía no es teóricamente la mejor posible. En general, no hay un medio eficaz para evitar estos óptimos locales. Se ha demostrado que ciertas tareas de aprendizaje requieren excesivo tiempo de ordenador para encontrar el óptimo global, y en la práctica el problema subsiste. Pero suele ser suficiente con alcanzar un buen óptimo local para que la máquina opere satisfactoriamente.

Pese a tales dificultades, el aprendizaje de las máquinas ha demostrado ser valioso en sí mismo, resolviendo una gran variedad de problemas del mundo real. Sus raíces hay que buscarlas varias décadas atrás, pero es en los años recientes cuando se actualiza y desarrolla. Sin duda, los procedimientos para aprender a través de pistas y otros avances técnicos futuros proporcionarán a las máquinas una capacidad de aprendizaje más integrada en nuestra vida cotidiana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LEARNING FROM HINTS IN NEURAL NETWORKS. Y. S. Abu-Mostafa en *Journal of Complexity*, vol. 6, n.º 2, págs. 192-198; junio de 1990.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE. Número especial de *Communications of the ACM*, volumen 37, n.º 3; marzo de 1994.

LEARNING FROM HINTS. Y. S. Abu-Mostafa en *Journal of Complexity*, vol. 10, n.º 1, págs. 165-178; marzo de 1994.

NEURAL NETWORKS IN THE CAPITAL MARKETS. Dirigido por Paul Refenes. John Wiley, 1995.

Perfiles

John Horgan

FRED HOYLE: *El regreso del mohicano*

Al caer la noche —la hora de los silencios— quizá la duda asalte al científico en lo más hondo del corazón: ¿Y si Fred Hoyle tuviera razón? En tal caso, la astronomía sería una farsa, la biología un castillo de naipes y la medicina moderna una ilusión. Nada menos.

Los que admiten los modelos establecidos pueden sentirse inquietos ante la oleada de simpatía desatada en favor de Hoyle, antaño vilipendiado e ignorado. No sólo las páginas de los periódicos tornan a respetar al iconoclasta de la teoría de la gran explosión y otros pilares de la ciencia moderna. "Un segundo amanecer del rebelde universal", titulaba el *Times* de Londres el otoño pasado.

Las revistas más prestigiosas no silencian su entusiasmo ante la autobiografía de Hoyle (*Home is where the wind blows*). "Qué gran fortuna disponer de esta autobiografía, tan bellamente escrita, de uno de los más sobresalientes científicos del siglo", se lee en *Nature*, que en 1993 se había despachado con este juicio: "Una completa documentación (sus últimos escritos) de cómo una mente brillante puede descarriarse en pos de ideas peregrinas."

La autobiografía de Hoyle recoge todo lo que consiguió en sus mejores años. En los cincuenta contribuyó a demostrar que somos polvo de estrellas; estamos hechos de elementos forjados en los núcleos estelares, vomitados al espacio por las supernovas. Fundó el Instituto de Astronomía Teórica de Cambridge a principios de los sesenta y fue su primer director. Con todo merecimiento se le otorgó un título nobiliario en 1972. Hoyle es Sir Fred.

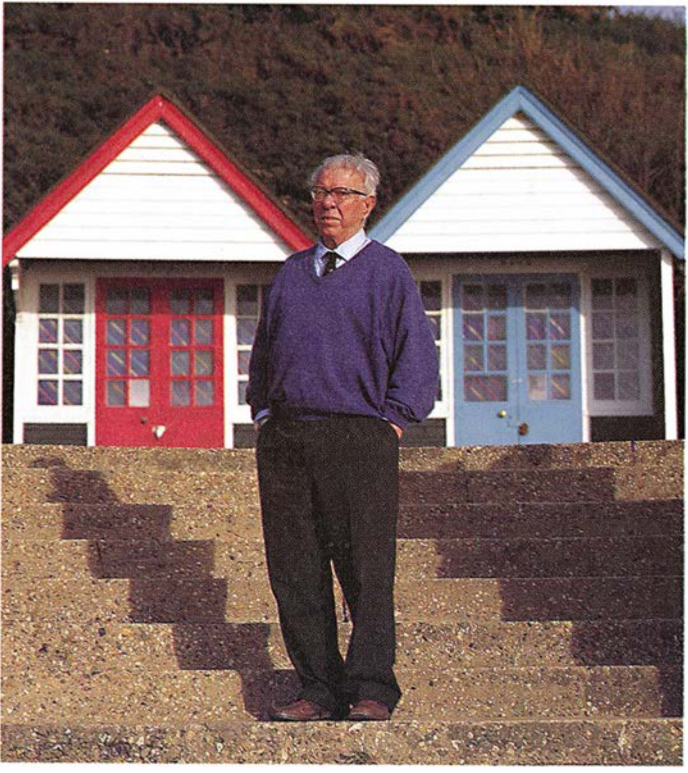
La personalidad de Hoyle añade atractivo a sus tesis. Con su lenguaje desenfadado, transpira una suerte de integridad proletaria. Tiene el aire del hombre que persigue sin ambages la verdad, sin que le importe el qué diran. Le sobra talento para parecer razonable. Cuando afirma que la vida debe proceder del espacio, señala que la Tierra era inhóspita hasta hace al menos 3800 millones de años, y la vida celular apareció casi con certeza hace 3700 millones de años. Y prosigue con su argumento: si uno traza un paralelismo entre la historia entera de nuestro planeta, de unos 4500 millones de años, y un día de 24 horas, se infiere que la vida apareció en una media hora.

"Hay que descubrir el ADN; hay que hacer miles de enzimas en esa media hora", me explica. "Y hay que hacerlo en un medio hostil. Así que yo, cuando considero todas estas cosas juntas, no encuentro que el resultado sea una situación muy atractiva." La generación espontánea de la vida en la Tierra, subrayó en una ocasión, sería tan poco probable como que un tornado que azotara un depósito de chatarra ensamblara un Boeing 747. Conforme va hablando, sin darme cuenta voy asintiendo con la cabeza. Desde luego que la vida no pudo haberse originado aquí. Sólo más tarde caigo en la cuenta de que, según el calendario de Hoyle, los simios se han transformado en humanos hace unos 20 segundos y la civilización moderna ha nacido hace menos de una décima de segundo.

La persistencia de Hoyle en defender sus tesis no ha resultado baldía. El verano pasado los radioastrónomos de Illinois encontraron la firma espectral de aminoácidos —los ingredientes básicos de las proteínas— en el espacio interestelar.

Recibe con sorna los nuevos aplausos. "Si un tío vive hasta los 80, se merece una palmada en la espalda." (Y es que Hoyle cumple 80 este mes de junio.) En su autobiografía Hoyle se describe como un chico brillante pero inquieto. Hijo de una maestra y de un comerciante de tejidos, solía hacer novillos e irse a ver las barcazas de las esclusas cercanas a su casa, en Yorkshire. Aun así, ingresó en Cambridge. Su director de tesis, el físico P.A.M. Dirac, le ayudó a sacar una plaza allí al poco de acabar la segunda guerra mundial.

Hoyle se colocó pronto en la primera línea de la astronomía, demostrando que la física nuclear podía aclarar fenómenos celestes como las enanas blancas, gigantes rojas, supernovas y las brillantes radiofuentes que más tarde se dieron en llamar cuásares. En 1953, sus investigaciones sobre la generación de elementos pesados le llevaron a predecir la existencia de un estado del isótopo carbono 12 desconocido hasta enton-



SIR FRED HOYLE, vilipendiado sin piedad, comienza a recuperar prestigio a los ochenta años

ces. William A. Fowler corroboró experimentalmente la predicción de Hoyle. El trabajo de éste sobre nucleosíntesis estelar culminó en un artículo de 1957, escrito junto con Fowler, Geoffrey R. y Margaret Burbidge, que sigue siendo un hito de la astrofísica moderna. Hasta los enemigos de Hoyle opinan que no debió quedar fuera del Nobel que, por ese trabajo, recibió Fowler.

Las especulaciones de Hoyle sobre el origen del universo —o sobre la ausencia de origen— surgieron a raíz de su amistad con Thomas Gold y Hermann Bondi, mientras diseñaban sistemas de radar durante la guerra. "Bondi tenía un pariente en algún lado —Bondi parecía tener parientes en todas partes— que le mandó una caja de botellas de ron", recuerda. Degustando el elixir de Bondi, los tres físicos recalaron en la eterna cuestión de los jóvenes embriagados: ¿De dónde venimos?

El hallazgo de que las galaxias del cosmos se están distanciando unas de otras ya había convencido a muchos astrónomos de que el universo había irrumpido en la existencia en un momento específico del pasado y que todavía se estaba expandiendo. La objeción fundamental de Hoyle a este modelo era y es filosófica: no tiene sentido hablar de creación del universo a no ser que exista ya el espacio y el tiempo donde crearlo.

"Se pierde la universalidad de las leyes de la física", explica. "La física deja de existir." La única alternativa a este absurdo, decidió, es que el espacio y el tiempo existieran desde siempre. Con Gold y Bondi ideó la teoría del estado estacionario, según la cual el universo, infinito en el espacio y el tiempo, genera sin cesar materia mediante algún mecanismo desconocido.

Junto con su antiguo colaborador Geoffrey Burbidge y el astrónomo hindú J. V. Narlikar, Hoyle ha elaborado una versión nueva y mejorada de la teoría del estado estacionario. Esta teoría del "estado cuasiestacionario" reemplaza la gran explosión ("big bang") por muchas pequeñas explosiones ("little bangs"), que quizá tienen lugar en los cuásares y otras galaxias activas. De tales microexplosiones emergen elementos ligeros (helio y litio) y arranca la expansión local de las galaxias.

Aunque Hoyle y sus colegas han publicado su teoría del estado cuasiestacionario en el *Astrophysical Journal* y otras de reputadísimo tenor, han ganado pocos adeptos. Se aduce que esa hipótesis sustituye con muchos milagros pequeños uno grande. Además, el grupo de Hoyle no ofrece explicación plausible a la radiación de microondas, descubierta en 1965, que muchos astrónomos creen que es el resplandor de la gran explosión. Hoyle insiste en que las versiones recientes de la teoría de la gran explosión —que sólo puede dar cuenta de las observaciones postulando enormes cantidades de materia oscura— tienen fisuras mucho más profundas. "Es pura escolástica."

Por ironía de las cosas, fue Hoyle, el más notorio de los oponentes a la gran explosión, quien acuñó el término en 1950, cuando impartía unas lecciones de astronomía por radio. No pretendía ridiculizarla, como a veces se ha escrito, sino darle una expresión plástica. El año pasado, una revista organizaba un concurso para cambiarle el nombre a la teoría. Tras considerar miles de sugerencias, no se encontró nada que valiera la pena para suplantar a "la gran explosión". No le sorprende. "Las palabras son como los rejones", comenta. "Una vez se clavan, son muy difíciles de sacar."

El universo es obviamente la elaboración de un diseño. Hay demasiadas cosas que parecen accidentales y no lo son

En los años sesenta Hoyle se vio obligado a limitar su dedicación a las teorías. Tuvo culpa de ello su compromiso con el Instituto de Astronomía Teórica de Cambridge. Aunque contribuyó a hacer del instituto un centro de renombre internacional, se cansó de luchar con los burócratas de la universidad por cuestiones administrativas y renunció a su puesto de director en 1972. La reconciliación no se produjo hasta 1992, cuando el instituto celebró un acto en su honor y le erigió un busto.

Hoyle afirma que no se arrepiente de haber abandonado el cargo. "Desde el punto de vista de las ideas fue un período idiotizante", dice. Empezó a colaborar con Wickramasinghe, ahora en la Universidad de Gales, en un estudio sobre moléculas complejas en el espacio. A partir de datos aportados por telescopios ópticos y de radio, llegaron a la conclusión de que el espacio está lleno no sólo de compuestos orgánicos, sino también de bacterias y otros organismos, una posibilidad que él había sopesado ya en 1957.

Hoyle y Wickramasinghe aseguran ahora que los microbios venidos del espacio engendraron la vida en la Tierra y espolearon la evolución más tarde. Quizá su hipótesis más controvertida sea que las epidemias de gripe, de catarro y de otras enfermedades se desatan cuando la Tierra atraviesa nubes de patógenos.

Disertando sobre las creencias biomédicas en las formas más convencionales de transmisión de la enfermedad, de persona a persona, Hoyle muestra un raro destello de ira. "No miran esos datos y dicen 'Bueno, pues están equivocados', y dejan de enseñarlos. Simplemente siguen repartiendo la misma basura. Por eso cuando vas al hospital y tienes algo mal, estás de suerte si te curan."

Pero si el espacio está rebosante de microorganismos, ¿cómo es que no se han detectado? Tal vez se han detectado, replica. Sospecha que experimentos estadounidenses en globos sonda de gran altura y otras plataformas hayan proporcionado pruebas, pero que los funcionarios las han encubierto. ¿Por qué? Quizá por razones de seguridad nacional, sugiere, o porque los resultados contradicen el acervo cultural recibido. (Científicos familiarizados con los experimentos a gran altura niegan semejantes afirmaciones.)

"La ciencia actual está aferrada a paradigmas", declara. "Cada senda está bloqueada por creencias equivocadas, y, si se intenta publicar algo en una revista científica hoy día, se choca contra un paradigma, y los editores lo rechazarán." Hoyle pone de relieve que él nunca ha dicho, como algunas informaciones aseguran, que el virus del sida tiene un origen extraterrestre. "Es un virus tan extraño que tengo que creer que es el producto de algún laboratorio", comenta. ¿Sugiere Hoyle que el patógeno podría haber sido producido por un programa de guerra biológica que no salió como se pensaba? "Sí, me parece que sí", es su respuesta.

Para Hoyle, el universo está hecho así a conciencia. Desde hace mucho piensa que la selección natural no puede por sí sola dar cuenta de la aparición y rápida evolución de la vida en la Tierra. Alguna inteligencia sobrenatural debe estar dirigiendo la evolución de la vida y también del cosmos entero —aunque hasta qué punto es algo que Hoyle no sabe. "El universo es obviamente la elaboración de un diseño. Hay demasiadas cosas que parecen accidentales y no lo son."

Ciencia y sociedad

Células citotóxicas naturales

Reconocimiento

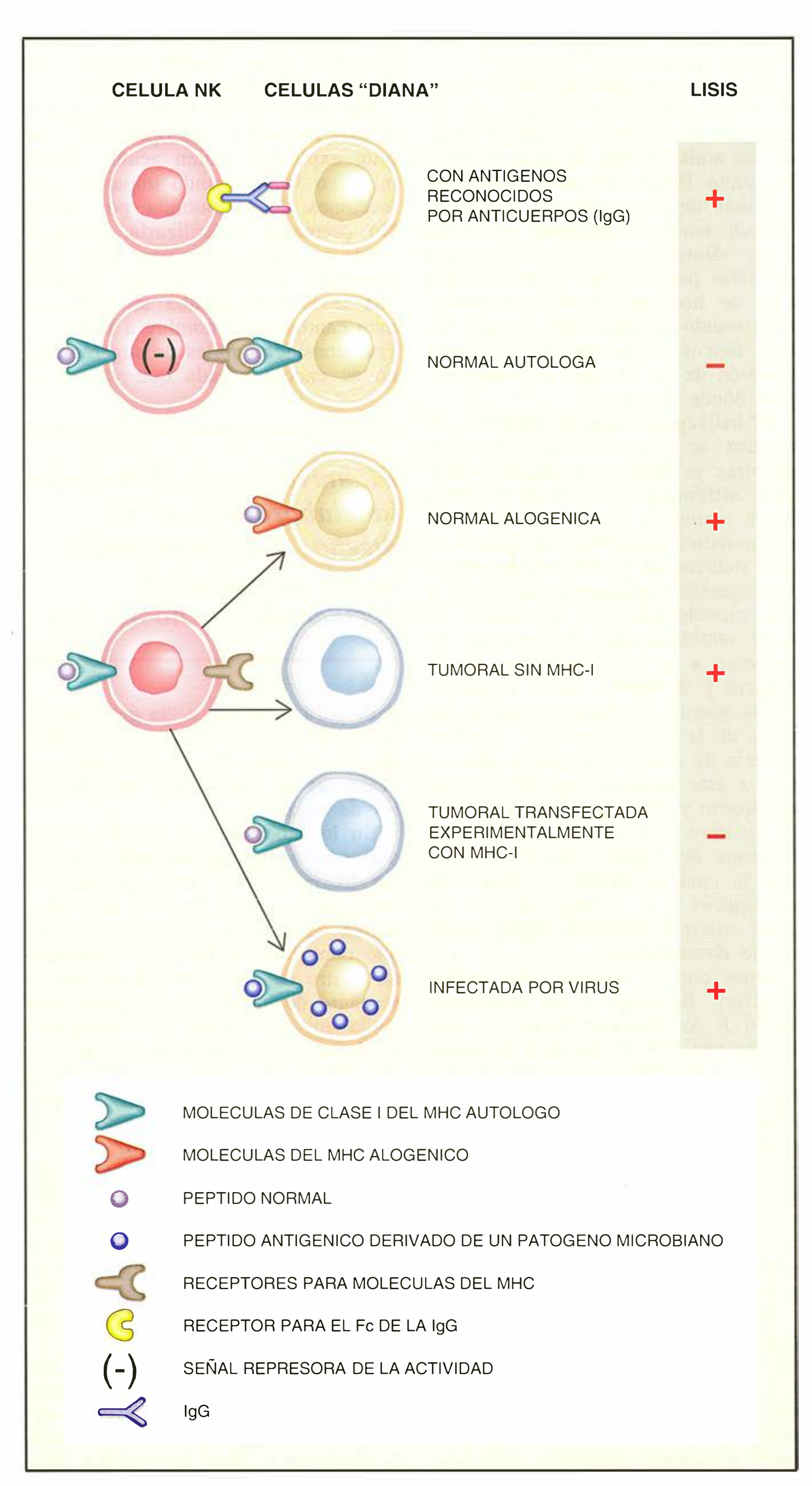
Por citotoxicidad se entiende la capacidad de ciertas células para interaccionar con otras y destruirlas. La poseen determinadas poblaciones del sistema inmunitario, de las que son prototipos los linfocitos *T* (*T* citotóxicos o *T*c) y las células citotóxicas naturales ("Natural Killer Cells", o NK). Intervienen en la defensa contra infecciones víricas y células tumorales, así como en el rechazo de trasplantes.

En el caso de los linfocitos *T*c, las estructuras implicadas en el reconocimiento específico son los receptores de antígeno (*T*cR), que interaccionan con los péptidos antigénicos asociados a moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) en la superficie de la célula "diana".

Las células NK constituyen una tercera estirpe de diferenciación linfoide originada a partir de precursores hematopoyéticos inmaduros, comunes con los linfocitos *T*. Comparten con éstos diversas propiedades, aunque carecen de *T*cR. En su mayoría expresan receptores de la inmunoglobulina G, lo que indica que son las principales responsables del mecanismo de citotoxicidad celular dependiente de anticuerpos.

Se acepta que las células citotóxicas naturales constituyen una de las primeras barreras de defensa inmunitaria, pues pueden destruir directamente células patológicas (infectadas por virus, tumorales), al tiempo que producen citocinas proinflamatorias, principalmente factor de necrosis tumoral e interferón gamma.

En los últimos años ha aumentado el interés por la investigación sobre la fisiología de estos linfocitos. Así, se ha demostrado que la función de las células NK está regulada por la expresión de moléculas de clase I del MHC (MHC I) en las células diana. Por medio de anticuerpos mo-



Mecanismos de citotoxicidad de las células NK: papel regulador de las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad

noclonales, se han identificado en la superficie de las células citotóxicas naturales un conjunto de moléculas que ejercen de receptores en la regulación de su actividad funcional, procediéndose a la clonación de los genes correspondientes.

Se sabe que la pérdida patológica de las moléculas del MHC I expone las células a la lisis, o destrucción, mediada por células NK. Por contra, el restablecimiento experimental de la expresión del MHC I, por transferencia génica inducida, les confiere resistencia. En otro orden, se ha observado que las células citotóxicas naturales pueden reconocer y destruir específicamente células alogénicas, vale decir, procedentes de individuos de la misma especie con distinto MHC. Los resultados, en su conjunto, indican que estos linfocitos disponen de receptores capaces de interaccionar con las moléculas de clase I del complejo principal de histocompatibilidad. En ello está implicado un segmento de la secuencia aminoacídica de dichas moléculas, localizado en la región a la que se unen los péptidos antigénicos.

Para explicar el mecanismo de reconocimiento se ha avanzado la hipótesis denominada "pérdida de lo propio". De acuerdo con la misma, la interacción entre ciertos receptores de la célula NK y las moléculas del MHC I reprimiría su capacidad lítica. Al perderse la expresión del MHC, como ocurre en algunos tumores o células infectadas por virus, desaparece la señal represora y se desencadena la citolisis; se supone que otro tanto sucede al modificarse la interacción receptor-ligando, en el caso de moléculas del MHC alogénicas o del cambio estructural determinado por la unión al propio MHC de péptidos derivados de un patógeno microbiano. Dicha hipótesis implica la existencia de otros receptores distintos con capacidad de estimular la citotoxicidad. Sin embargo, y a tenor de algunos resultados recientes, cabría postular un modelo complementario en el que los mismos tipos de receptores podrían condicionar alternativamente la activación o inactivación de la célula NK en función de otras variables.

Hasta hace poco, las bases moleculares de los mecanismos de reconocimiento constituían una incógnita; sin embargo, se han aislado ya diversas glucoproteínas de la superficie de la membrana plasmática expresadas por las células citotóxicas naturales y por una subpoblación de linfocitos *T*c. Hay indicios experimentales de que algunas de estas estructuras podrían ser receptores en la interacción específica con moléculas de clase I del sistema HLA (MHC humano), que reprimieran, de acuerdo con la hipótesis mencionada antes, la función de las células NK.

Por otra parte, se han identificado en roedores dos grupos de glucoproteínas homólogas (Ly49 y NKR-P1), cuyos genes se agrupan en una región del cromosoma 6 de ratón, denominada complejo NK. Pertenecen a una superfamilia de moléculas que presentan un dominio extracelular con estructura de lectina tipo C, es decir, con afinidad por oligosacáridos. Se ha demostrado directamente que los receptores Ly49 interaccionan con moléculas del sistema H-2 MHC de ratón.

En la especie humana, tras la identificación en nuestro laboratorio del receptor CD94, se ha aislado el gen correspondiente, y el homólogo de NKRP-1. Lo propio ha ocurrido con una tercera familia de genes emparentados (NKG2). Todos ellos se expresan en las células NK, comparten rasgos estructurales en su dominio lectina y se localizan en el cromosoma 12, sinténico al 6 de ratón, lo que indica inequívocamente la existencia de un complejo génico NK (NKC) humano, conservado durante la evolución filogenética. Probablemente, la mayoría de los miembros de esta superfamilia de receptores, en vez de intervenir en el reconocimiento del MHC, disparen la actividad NK al detectar alteraciones en la glucosilación de moléculas de superficie de las células patológicas.

La proporción de células citotóxicas naturales que presentan un determinado receptor varía con los individuos; además, una misma célula puede expresar simultáneamente diferentes tipos de receptores. Tal grado de complejidad dificulta el diseño de sistemas experimentales adecuados para abordar su estudio. No obstante, la clonación molecular de los genes permite analizar con precisión la naturaleza de los ligandos, esencial para entender su mecanismo de acción.

Aunque persisten importantes incógnitas, cabe esperar en un próximo futuro nuevos avances sobre la función fisiológica de este conjunto de receptores, lo que abrirá interesantes perspectivas aplicadas, particularmente en los campos del trasplante de médula ósea y de la oncología.

MIGUEL LÓPEZ-BOTET
Servicio de Inmunología
Hospital de la Princesa
Universidad Autónoma
de Madrid

Inmunodeficiencias

De origen genético

El sistema inmune es como un sexto sentido, que avisa al individuo de que han aparecido en su territorio propio microorganismos extraños o incluso células tumorales.

Mediante sus receptores de superficie, los linfocitos *B*, madurados en la médula ósea, y los *T*, madurados en el timo, reconocen a los antígenos extraños, se activan y, los *T* sobre todo, producen unas sustancias: las interleucinas (IL), que alertarán a otros linfocitos, leucocitos y macrófagos, e incluso al mismo sistema nervioso autónomo. Así, la IL-1, producida por las células que presentan al antígeno al linfocito *T*, "avisa" al centro hipotalámico de control de temperatura de que hay una infección, aumentándose en respuesta la temperatura corporal. Otras interleucinas ejercen efectos que intensifican la respuesta inmunitaria hasta el punto necesario para eliminar lo que no es del propio organismo.

En teoría, puede haber menoscabo del sistema inmunitario, "déficit", en cualquier nivel de su funcionamiento: (*1*) en las moléculas que presentan el antígeno, o moléculas de histocompatibilidad; (*2*) en las moléculas que reconocen el antígeno en la superficie de los linfocitos *B* (inmunoglobulinas), o en la superficie de los linfocitos *T* (receptor específico de las células *T*); (*3*) en las moléculas accesorias que mantienen a las células *B* y a las presentadoras en contacto con las células *T*, como es el caso de la deficiencia del receptor de CD40, que provoca inmunodeficiencia con aumento de la inmunoglobulina M y descenso de otras; (*4*) en los mecanismos intracelulares de activación de linfocitos *B* y *T*, aún poco conocidos, pero en los que intervienen varias quinasas de tirosina. En este cuarto grupo se puede incluir la inmunodeficiencia por la existencia de una molécula alterada de adenosín deaminasa (ADA), lo que produce acumulación de metabolitos muy tóxicos para los linfocitos. A propósito de esta enfermedad, se ha ensayado con éxito la introducción de genes normales de ADA con la cura consiguiente de la inmunodeficiencia. Y (*5*) en las moléculas de interleucinas y sus receptores de la superficie celular.

También existen anomalías en el desarrollo de los órganos donde van a madurar los linfocitos *T*, cuyo defecto genético no se conoce bien, así el síndrome de Di George, que se caracteriza por graves trastornos del

INMUNODEFICIENCIAS DE ORIGEN GENETICO			
DEFECTO	**ANOMALIA MOLECULAR**	**CROMOSOMA**	**SINTOMATOLOGIA**
Linfocito llamado “pelado” (no hay moléculas HLA de clase II)	Transactivadores de zona promotora de genes HLA	?	Inmunodeficiencia severa combinada
Mala adhesión entre linfocitos T y células presentadoras; paso de leucocitos a tejidos deficiente	CD18	21	Deficiencia de adhesión leucocitaria
Mal transporte de antígenos a las moléculas presentadoras (HLA)	Molécula transportadora (TAP) anómala	6	Inmunodeficiencia severa combinada
Mala diferenciación de linfocitos B-hipogammaglobulinemia de Bruton	Mutaciones en la quinasa de tirosina Btk	X	Deficiencia de inmunoglobulinas
Mala recombinación de las regiones V-D y J de las inmunoglobulinas y del receptor clonotípico T	Metabolismo de recombinasas alterado; varias proteínas anormales	2 5 8	Inmunodeficiencia severa combinada
Mala adhesión entre linfocitos T y células B	Ligando de CD40	X	Hiper IgM; Inmunodeficiencia
Defecto del receptor de los linfocitos T	CD3γ	11	Inmunodeficiencia severa combinada
Defecto del receptor de los linfocitos T	CD3ε	11	Inmunodeficiencia severa combinada
Defecto de una quinasa de tirosina, acoplada al receptor del linfocito T	Zap70	2	Inmunodeficiencia severa combinada
Defecto de la cadena γ común al receptor de la IL-2 y a otros receptores de IL	Receptores de IL-2, IL-4, IL-7, IL-9 e IL-15	X	Inmunodeficiencia severa combinada
Defecto de IL-2	No se produce suficiente proteína IL-2	?	Inmunodeficiencia severa combinada
Defecto de NF-AT	Falta un factor (NF-AT) de transcripción necesario para muchas moléculas inmunitarias	?	Inmunodeficiencia
Toxicidad en los linfocitos por acumulación de metabolitos	Adenosín deaminasa	20	Inmunodeficiencia severa combinada
	Purín nucleótido fosforilasa	14	Inmunodeficiencia severa combinada
Inmunodeficiencia de Wiskot-Aldrich	Alteración de CD43 y otras proteínas polisacaridadas	X	Inmunodeficiencia severa combinada. Déficit de plaquetas
Deficiencia de FAS; ¿deficiencia de apoptosis?	Mutaciones en FAS	10	Inmunodeficiencia severa combinada. Autoinmunidad

desarrollo del timo. Pueden darse, además, deficiencias congénitas en la función de macrófagos y otros leucocitos, y en el sistema del complemento. Este último consiste en un conjunto de proteínas que, activadas en cascada por las inmunoglobulinas o por microbios, terminarán por destruir los gérmenes.

La disposición de nuevas técnicas de identificación y multiplicación ("amplificación") de genes ha revolucionado el panorama de las inmunodeficiencias heredadas. Hace unos pocos años, a muchos pacientes infantiles se les diagnosticaba de "inmunodeficiencia severa combinada" (ISC), para designar su grave sintomatología y su daño inmunitario de ambas líneas linfocíticas, *T* y *B*. Aunque todavía se recurre a ese cajón de sastre sintomatológico, de muchas ISC conocemos ya su defecto genético y molecular. Así, se han visto niños deficientes del receptor del linfocito *T* (CD3γ o ε) y se han identificado sus genes anormales. Se ha comprobado también que los genes de las cadenas gamma de los receptores de IL-2, comunes a los receptores de IL-4, IL-7, IL-9 e IL-15, son anómalos en la llamada inmunodeficiencia severa combinada ligada al cromosoma X.

Del descubrimiento de los genes anómalos de las inmunodeficiencias podemos extraer varias lecciones importantes que resumo en tres. En primer lugar, la posibilidad de introducir genes normales en los individuos afectados, mediante las terapias génicas adecuadas, como ya es realidad en el déficit de adenosín deaminasa. En segundo lugar, la demostración de la gran redundancia del sistema inmunitario en casos, como en las deficiencias de CD3γ o ε, donde algunos individuos afectados van, con dificultades, sobreviviendo, cuando la mayoría de sus linfocitos *T* no son capaces de reconocer antígenos, al carecer del receptor de superficie. Hay mecanismos diversos y complementarios de ataque, por ejemplo, contra un determinado virus al que pueden intentar neutralizar conjuntamente los linfocitos *T*, las células asesinas, las inmunoglobulinas de los linfocitos *B* y el sistema del complemento. Por último, algunos inmunodeficientes congénitos —pensemos en la deficiencia de CD3γ— presentan fenómenos de autoinmunidad, lo que les convierte en modelos espontáneos para comprender la relación entre autoinmunidad e inmunodeficiencia.

ANTONIO ARNÁIZ VILLENA
Dpto. Inmunología
Hospital 12 de Octubre. Madrid

Seísmos

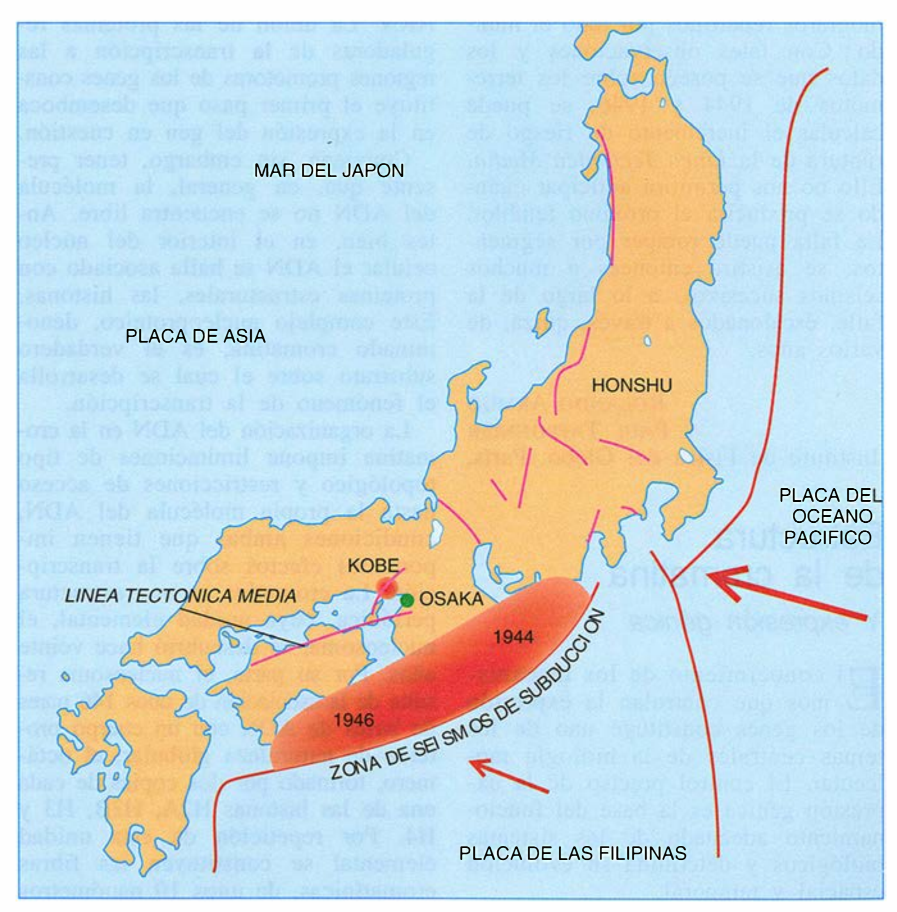
En cadena

Aunque los movimientos de la corteza terrestre provocan frecuentes seísmos en Japón, se había perdido el recuerdo de otro deslizamiento de falla que precedió al desencadenante de la catástrofe del 17 de enero del año en curso. Pero los sismólogos sí tenían conciencia de que el temblor podría producirse. Conocían también los focos más probables desde donde se propagaría hasta los más cercanos.

La corteza terrestre está formada por placas que se mueven unas con respecto a otras. Se alejan, colisionan y encabalgan. Cerca de la costa suroeste de Japón, las placas oceánicas del Pacífico y las Filipinas se hunden bajo la placa continental de Asia. Esta subducción, que procede a una velocidad media de varios centímetros por año, está frenada por el rozamiento mutuo entre placas: los bodes de placa se comprimen. Cuando se acumula energía suficiente en un segmento de la frontera entre las dos placas, los bordes se distienden bruscamente: se produce un temblor de tierra *in situ*. Ese episodio sísmico se reproduce en los mismos lugares con una periodicidad aproximada de cada cien años.

Las presiones ejercidas sobre la placa continental de Asia fracturan los bordes: el archipiélago japonés está recorrido por una red de fallas pequeñas. En éstas se asientan también los temblores: cuando las presiones que se ejercen rebasan cierto umbral, los bloques que las limitan se desplazan. Sobre una misma falla, se requieren miles de años para alcanzar la tensión que acabará por desencadenar el seísmo. Por consiguiente, los temblores de este tipo son harto raros, si los comparamos con los provocados por el proceso de subducción. La magnitud del seísmo es proporcional a la longitud de la falla. En Japón, hay una docena de fallas de longitud suficiente para provocar seísmos de magnitud superior a seis, muy destructivos.

Bajo la ciudad de Kolbe pasa una de esas fallas. Los estudios de campo emprendidos por los geólogos japoneses llegaron a la conclusión de que sería la causante de un temblor de



Japón se encuentra en el margen de la placa continental de Asia, sobre la cual avanzan las placas del Pacífico (a unos 10 cm por año) y de las Filipinas (a unos 4 cm por año). Las presiones ejercidas provocan seísmos y fracturan el archipiélago. Una de las fallas más peligrosas pasa por debajo de Kobe

magnitud siete cada 2000 años, aproximadamente. El último episodio conocido aconteció hace más de 1000 años, por lo que la probabilidad de un nuevo seísmo no era en absoluto despreciable. El movimiento de magnitud 7,2 que sucedió el 17 de enero verificaba, pues, una dolorosa previsión.

Los bordes de la falla se han deslizado de dos a cuatro metros, sobre una distancia de 40 a 50 kilómetros. Las presiones tectónicas aumentaron, pues, en cada una de sus extremidades. Como el extremo meridional se une a la *Línea Tectónica Media*, falla de 300 kilómetros, la energía acumulada sobre esta última se halla más cercana al umbral de ruptura: la probabilidad de un seísmo ha aumentado. Estas presiones sobre la *Línea Tectónica Media* se añaden a las creadas por los seísmos de subducción que castigaron a la región en 1944 y 1946. Un deslizamiento en pleno de esta falla provocaría un seísmo de magnitud ocho, vale decir, de una intensidad 20 o 30 veces superior al que destruyó Kobe.

La observación *in situ* de los desplazamientos de la corteza terrestre delimitará los movimientos ya calculados a partir de registros de sismógrafos repartidos por todo el mundo. Con tales observaciones y los datos que se poseen sobre los terremotos de 1944 y 1946, se puede calcular el incremento de riesgo de ruptura de la *Línea Tectónica Media*. Ello no nos permitirá anticipar cuándo se producirá el próximo temblor. La falla puede romper por segmentos; se asistirá entonces a muchos seísmos sucesivos, a lo largo de la falla, escalonados a través, quizá, de varios años.

ROLANDO ARMIJO
Y PAUL TAPPONNIER
Instituto de Física del Globo, París.

Estructura de la cromatina

Y expresión génica

El conocimiento de los mecanismos que controlan la expresión de los genes constituye uno de los temas centrales de la biología molecular. El control preciso de la expresión génica es la base del funcionamiento adecuado de los sistemas biológicos y determina su evolución espacial y temporal.

La regulación de la expresión génica acontece durante la síntesis del ARN (transcripción), en el posterior procesamiento del ARN y en su traducción ulterior en proteína. Hemos avanzado bastante, a lo largo de los últimos diez años, en la comprensión de los mecanismos básicos de control de la expresión génica, sobre todo de los que intervienen en la transcripción. Se han identificado los elementos de la molécula del ADN que participan en dicho proceso y que determinan el inicio de la transcripción y su terminación.

Las regiones promotoras, que dirigen el inicio de la transcripción, contienen secuencias de ADN reconocidas por diferentes factores proteicos: los reguladores de la transcripción. Algunas de estas proteínas, los factores de transcripción, intervienen en el control de la expresión basal de los genes. Un segundo grupo de factores, los activadores, son los responsables de la activación selectiva de ciertos genes en respuesta al medio y a lo largo del desarrollo y diferenciación celulares.

En el proceso de activación de la expresión génica, se da la interacción ordenada de diferentes elementos reguladores para facilitar, en última instancia, la incorporación de la ARN polimerasa al complejo de transcripción y el inicio de la síntesis del ARN. La unión de las proteínas reguladoras de la transcripción a las regiones promotoras de los genes constituye el primer paso que desemboca en la expresión del gen en cuestión.

Conviene, sin embargo, tener presente que, en general, la molécula del ADN no se encuentra libre. Antes bien, en el interior del núcleo celular el ADN se halla asociado con proteínas estructurales, las histonas. Este complejo nucleoproteico, denominado cromatina, es el verdadero substrato sobre el cual se desarrolla el fenómeno de la transcripción.

La organización del ADN en la cromatina impone limitaciones de tipo topológico y restricciones de acceso hasta la propia molécula del ADN, condiciones ambas que tienen importantes efectos sobre la transcripción. La cromatina es una estructura periódica, cuya unidad elemental, el nucleosoma, se descubrió hace veinte años. Por su parte, el nucleosoma resulta de la asociación de unos 146 pares de bases de ADN con un cuerpo proteico de naturaleza globular, el octámero, formado por dos copias de cada una de las histonas H2A, H2B, H3 y H4. Por repetición de esta unidad elemental se constituyen las fibras cromatínicas, de unos 10 nanómetros de diámetro, que, a su vez, pueden organizarse en estructuras más complejas en cuya formación interviene una quinta histona, la histona H 1.

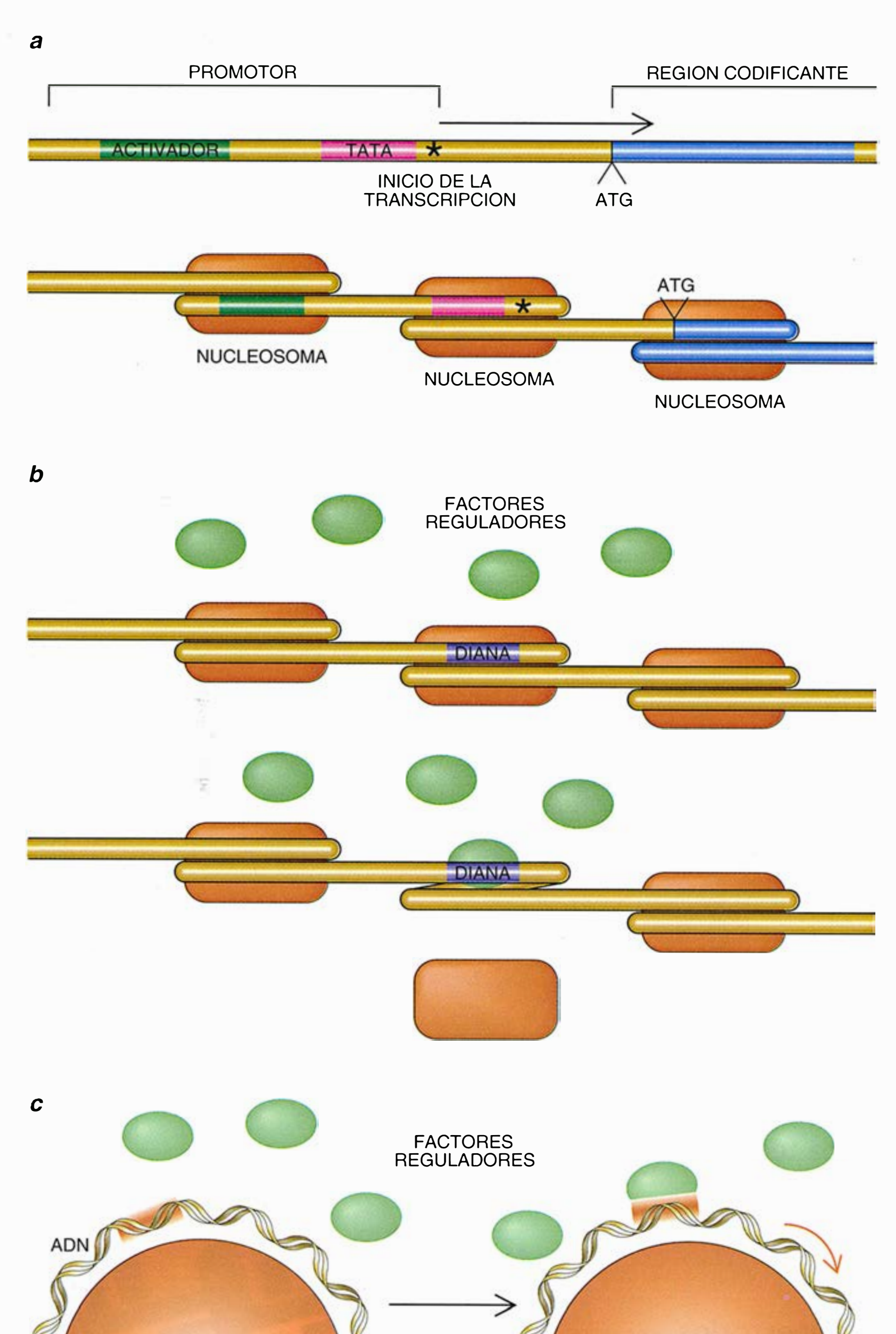
En principio, la organización nucleosómica de la cromatina supone un serio obstáculo para la progresión de la ARN polimerasa durante la transcripción. De hecho, los genes que se transcriben muy intensamente —los genes ribosómicos, por ejemplo— carecen de nucleosomas mientras se están expresando. Pero la mayoría de los genes presentan tasas de transcripción mucho menores y, en tales casos, se transcriba o no el gen, siempre se detecta la presencia de nucleosomas. No obstante, la organización de los nucleosomas en el gen activo difiere de la correspondiente al mismo gen en su estado inactivo.

Tiempo atrás, parecía difícil aceptar que el nucleosoma pudiera resistir el paso de una molécula de tamaño dos veces mayor, como es la ARN polimerasa. Ahora empezamos a entender cómo se desarrolla este proceso. Cuando la ARN polimerasa sale al encuentro de un nucleosoma, procede fácilmente a lo largo de los primeros 30 pares de bases de la cadena de ADN nucleosómico. El avance de la ARN polimerasa a través del nucleosoma va acompañado del progresivo desplazamiento del ADN nucleosómico, hasta alcanzar un punto en donde el ADN liberado por la acción de la enzima vuelve a unirse al octámero de histonas, formando un lazo que incluye en su interior a la ARN polimerasa. A partir de este momento, el avance de la ARN polimerasa se hace mucho más difícil y lento. Ese avance amortiguado se prolonga hasta que la ARN polimerasa alcanza la mitad del nucleosoma, momento que constituye otro punto crítico en la progresión de la enzima a través del nucleosoma.

Una vez superado el punto medio del nucleosoma, la ARN polimerasa avanza de nuevo con facilidad, incluso más rápidamente que a lo largo de los primeros 30 pares de bases de ADN nucleosómico. Este segundo punto de inflexión coincide con el desplazamiento total del octámero proteico: situado hasta entonces delante de la ARN polimerasa, pasa a colocarse por detrás de la enzima. Durante todo el proceso, el octámero de histonas se mantiene asociado, sin perder su identidad molecular. Los resultados experimentales sugieren que el octámero de histonas se encuentra constantemente asociado al ADN.

Además de constituir un obstáculo físico para la progresión de la ARN polimerasa, el nucleosoma restringe el acceso de los factores de transcripción a las regiones promotoras de los genes. De entrada, podemos considerar que el ADN alojado en el

interior de un nucleosoma es inaccesible; por tanto, los factores de transcripción no alcanzan a reconocer sus lugares de unión si éstos se hallan incluidos en un nucleosoma. En consecuencia, el primer paso del proceso de activación génica suele consistir en la modificación de la organización nucleosómica de la región promotora de suerte que deje vía libre a los factores reguladores de la transcripción. De entre los estudios que sugieren esta posibilidad, destacan los correspondientes al sistema de respuesta a la falta de fosfatos (*PHO*) en la levadura *Saccharomyces cerevisiae.*



*Estructura de la cromatina y expresión génica. En el interior del núcleo celular, el ADN no se encuentra desnudo, sino que está asociado con proteínas nucleares estructurales (histonas) formando nucleosomas. Los nucleosomas ocluyen las secuencias reguladoras que se encuentran localizadas en las regiones promotoras (**a**). En general, la activación génica requiere la modificación de la organización nucleosómica de las regiones promotoras de modo que las secuencias reguladoras sean accesibles a los factores de transcripción. La modificación de la estructura de la cromatina de estas regiones puede conseguirse por medio de la disociación de nucleosomas (**b**) o de la alteración de su estructura interna (**c**)*

En este sistema, la inducción de la expresión del gen *PHO5*, que es el último eslabón de la respuesta a la falta de fosfatos, está controlada por el factor regulador PHO4. El promotor del gen *PHO5* contiene dos lugares de unión para PHO4, ambos imprescindibles en la activación de *PHO5*. Uno de estos lugares de unión se encuentra en el interior de un nucleosoma; le está, pues, vedado su acceso al factor regulador. La activación de *PHO5* transcurre con la pérdida del nucleosoma que ocluye este segundo lugar de unión para PHO4. En este caso, el propio factor PHO4 parece desempeñar un papel crucial en la disgregación del nucleosoma.

En otros casos, la situación es más compleja. La activación transcurre sin pérdida aparente de nucleosomas, dada la peculiar estructura de éstos. El ADN nucleosómico se sitúa en la superficie de la partícula nucleoproteica, exponiendo una de sus caras al octámero proteico central y la otra al solvente. Las secuencias de ADN contenidas en la cara expuesta al solvente no son totalmente inaccesibles y pueden reconocerlas los factores de transcripción. Así, a veces, la activación génica se consigue modificando la distribución espacial del ADN en el nucleosoma, de modo que las secuencias de unión para los factores reguladores pasen de la cara inaccesible a la accesible. Más aún, la organización del ADN en el nucleosoma puede facilitar la unión simultánea de varios factores reguladores.

En cualquier caso, sea mediante la disgregación de los nucleosomas o la alteración de su estructura interna, la activación génica suele requerir la modificación de la organización nucleosómica de las regiones promotoras. Poco se sabe todavía acerca de los factores involucrados en estos cambios y, todavía menos, sobre sus mecanismos de acción. En el caso del gen *PHO5*, los propios factores de transcripción parecen intervenir en el proceso de modificación de la estructura de la cromatina.

Se ha descrito también la existencia de factores específicos (GAGA, SIR3/SIR4, SWI/SNF, Polycomb) encargados de "catalizar" los cambios estructurales de la cromatina. En algunos casos la acción de estos factores requiere la hidrólisis de ATP, en otros no. Finalmente, las propias histonas, a través de su interacción específica con algunos de estos fac-

tores, pueden desempeñar, en ciertos casos, un papel central en el proceso de reorganización de la cromatina durante la expresión génica.

FERRAN AZORÍN
Profesor de Investigación-CSIC
Centro de Investigación
y Desarrollo. Barcelona

Reflexiones cometarias

Tras el impacto

La del 31 de octubre de 1994 era noche del Halloween, cuando, en los países anglosajones, los niños van por las casas repitiendo "trick or treat" ("premio o castigo"). Si los inquilinos de la casa les dan una naranja, o algo de dinero, el acto se considera una recompensa; pero si les niegan el premio, los chavales inundan de espuma de afeitar el buzón del correo o les hacen cualquier otra trastada. Esa misma noche, cientos de astrónomos se reunieron en Bethesda, para celebrar su particular juego de premio y castigo. El premio consistía en una abundante cosecha de observaciones sobre la muerte de Shoemaker-Levy 9, el cometa que se estrelló contra Júpiter el pasado mes de julio. El castigo impuesto era esforzarse en buscarle explicación y sentido.

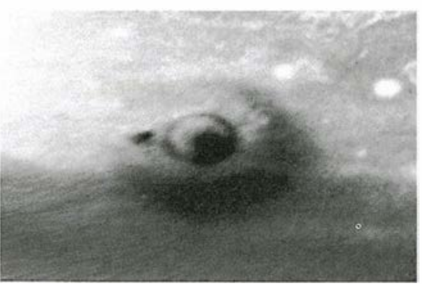
Aunque muchos de los asistentes a esa reunión de la División de Ciencias Planetarias presenciaban por vez primera los resultados de sus colegas, respirábase en el ambiente cierta sensación de unanimidad. Por ejemplo, a propósito de la naturaleza precisa de Shoemaker-Levy 9. Los primeros análisis sobre los restos de los impactos no habían encontrado señales de agua. Ahora bien, según se admite, los cometas normales contienen hielo. ¿Sería, pues, Shoemaker-Levy 9 un fragmento asteroideo?

G. L. Bjoraker, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, de la NASA, informó, por contra, que poseía pruebas directas de la existencia de agua, en una cantidad equivalente a una bola de hielo de un kilómetro de ancho. "En ese cometa no hay deficiencia de hielo", declaró Eugene M. Shoemaker, del Observatorio de Lowell, satisfecho de que el objeto que lleva su nombre no fuese degradado a la condición de asteroide. Otros investigadores detectaron una compleja mezcla de Júpiter y fragmentos de cometa vaporizados: metales, monóxido de carbono y bastante azufre.

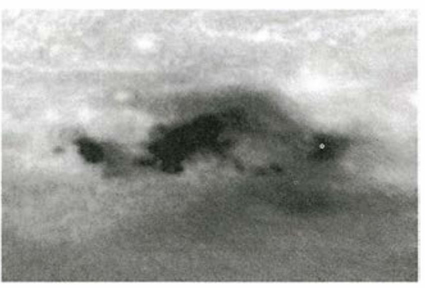
Los astrónomos comenzaron a articular una explicación plausible para las grandes manchas oscuras, cuya presencia era totalmente inesperada, que aparecieron en la superficie de Júpiter tras el impacto. Carl Sagan, de la Universidad de Cornell, adujo que las manchas serían de compuestos de carbono procedentes de las moléculas orgánicas del cometa. Al término de la sesión, la mayoría se puso de su lado.

Para otros aspectos del impacto no había justificación a mano. Los intensos destellos y las plumas ingentes formadas fueron objeto de un debate prolongado. Heidi B. Hammel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, presentó pruebas, recogidas con el *Telescopio Espacial Hubble*, de que esas columnas se elevaban 3000 kilómetros por encima de las nubes de Júpiter, aunque los fragmentos que las componían presentaban tamaños muy diferentes. ¿Por qué una colisión tan pequeña salpica como si fuera grande? "Tendréis que preguntar a los que hacen los modelos", respondió, "pero así es".

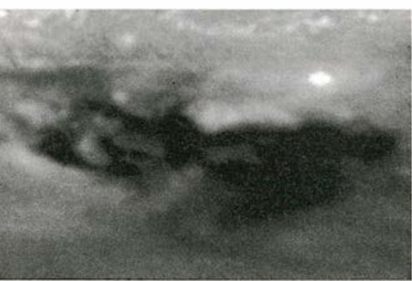
18 DE JULIO DE 1994



23 DE JULIO DE 1994



30 DE JULIO DE 1994



24 DE AGOSTO DE 1994



Anillos oscuros compuestos de polvo y formados alrededor de los lugares donde se produjo el impacto de los fragmentos mayores del Shoemaker-Levy 9. Pasadas algunas semanas, el material se dispersó por flujos en dirección este-oeste en la estratosfera de Júpiter

Se atisbaba un patrón de comportamiento algo diferente para los destellos. Imke de Pater, de la Universidad de California en Berkeley, describió las observaciones realizadas con el telescopio gigante Keck en Hawai, que mostraban que cada trozo de cometa producía tres fulguraciones. De acuerdo con su hipótesis, el fragmento se desintegraba para formar una franja de desechos de 1800 kilómetros de longitud. La fulguración inicial representaba los primeros trozos cometarios, a medida que se estrellaban contra la parte más alejada del planeta. La segunda fulguración aparecía cuando la bola de fuego resultante ascendía hasta entrar en el campo de visión directo del observador. El destello final y más intenso tenía lugar cuando el material volvía a caer en la atmósfera, donde se calentaba hasta producir un brillo incandescente.

El análisis llevado a cabo por de Pater se apoyaba en la consulta realizada a Mordecai-Mark Mac Low, de la Universidad de Chicago, quien presentó simulaciones por ordenador del impacto. Mac Low se encargó de responder muchas de las preguntas que surgieron, pero en general los astrónomos asistentes parecían aceptar su modelo, excepto Shoemaker, quien se mantuvo escéptico. "Es absurdo", exclamó, razonando que el material de retorno no produciría la energía suficiente para generar destellos de tamaña intensidad. Cuando se conozcan mejor los pulsos de radiación, podremos entender la distribución de la energía tras esos impactos gigantescos —incluidos los causantes de las extinciones en masa.

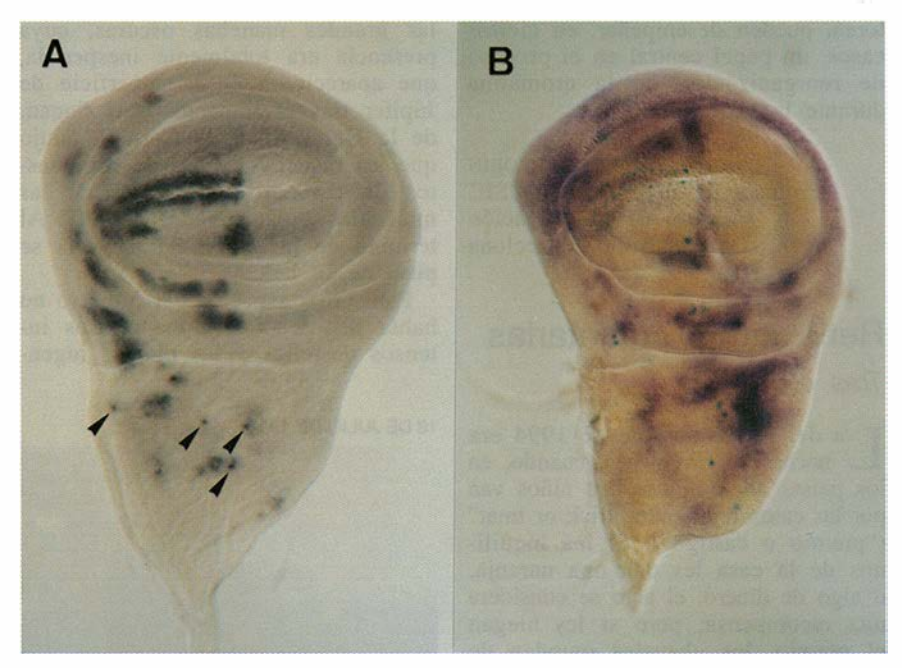
Los numerosos misterios que quedaron por resolver tuvieron su dosis de magia. Hammel sacudió el letargo de algunos asistentes con imágenes de las manchas oscuras, muchas de las cuales forman, en un comienzo, delicados anillos y figuras en forma de "bigotes". Andrew P. Ingersoll, del Instituto de Tecnología de California, propuso que estas complejas figuras las crean el material arrancado por el impacto y una onda de gravedad

asociada, una especie de perturbación atmosférica en sentido ascendente y descendente. Se supone que las ondas provocan que la materia orgánica vaporizada se condense en un punto muy alto de la atmósfera de Júpiter. Hammel estimó que el "agujero" inicial en la atmósfera que forjó los anillos tendría un diámetro de 500 kilómetros.

La pregunta del millón fue, obviamente, la relativa a la frecuencia de los impactos cometarios. Una cadena de cráteres adorna la superficie de las lunas de Júpiter dando fe de los impactos de anteriores cometas que, como el Shoemaker-Levy 9, se rompieron en pedazos. Paul M. Schenk, del Instituto Planetario y Lunar de Houston, analizó esos cráteres y concluyó que los cometas se aventuran por el sistema de Júpiter cada 150 años, aproximadamente.

La falta de respuestas definitivas no desanimó a ninguno de los asistentes, y menos a Shoemaker. "Fue fantástico; me sentía en la gloria", comentó. "Ahora quiero una síntesis definitiva", declaró Ingersoll animando a todos a realizar un esfuerzo supremo para lograr explicar las observaciones porque, en sus palabras, "esto podría ocurrir de nuevo". Cuando lo decía estaba pensando en otros datos, los suyos: la probabilidad de que un cometa alcance a Júpiter es 10.000, si no un millón de veces superior a la posibilidad de un impacto cometario en la Tierra. ¿O acaso estaba señalando que el próximo premio de Halloween nos caerá más cerca?

COREY S. POWELL



Distribución de la proteína ac en los grupos proneurales del disco imaginal de ala, visualizada mediante un anticuerpo contra esta proteína (A). *Las puntas de flecha indican algunas CMOS que ya han aparecido dentro de grupos proneurales y que contienen grandes cantidades de proteína ac en su núcleo. En la fotografía de la derecha, se advierte la distribución del ARN mensajero del gen* emc (en violeta). *Se puede observar que las CMOS* (en verde) *aparecen no sólo dentro de grupos proneurales* (A), *sino también en regiones del disco imaginal donde hay transcripción mínima de* emc

Desarrollo

Generación de patrones morfológicos

El mundo biológico nos ofrece la contemplación de infinidad de patrones morfológicos, desde las rayas de las cebras y las manchas en el pelaje de los tigres hasta los anillos de la serpiente de coral y los dibujos de las alas de las mariposas. La génesis de estos patrones siempre ha atraído el interés de quienes investigan el desarrollo de los seres vivos.

Uno de los patrones que han recibido mayor atención por parte de los estudiosos ha sido el formado por los pelos de la mosca *Drosophila melanogaster.* Estas quetas, su nombre correcto, son órganos sensoriales que permiten al díptero relacionarse con el mundo exterior, ayudándole a percibir estímulos mecánicos o químicos. (Siempre nos ha sorprendido la rapidez con que las moscas acuden a desechos olorosos.) Pues bien, en *Drosophila* la quetas aparecen individualmente en posiciones muy constantes o en grupos con disposiciones características que abarcan regiones específicas de la cutícula.

La queta tiene su origen en la célula madre del órgano sensorial (CMOS), célula que sufre dos divisiones diferenciales. Cada una de las cuatro células resultantes se diferencia en un componente distinto del órgano sensorial; a saber: la queta propiamente dicha, la célula basal en la epidermis donde se ancla el pelo, la neurona que inerva el órgano sensorial y proyecta al sistema nervioso central, y una célula parecida a la glía. Cada CMOS aparece en un sitio característico de los discos imaginales, los rudimentos epiteliales que, en el curso de la metamorfosis, originarán la epidermis y cutícula del adulto. Así pues, el problema de explicar la generación del patrón de quetas se reduce en buena parte a explicar por qué las CMOS aparecen en posiciones precisas de los discos imaginales.

El análisis genético había indicado que un grupo de genes integrado en el complejo *achaete-scute*, el C-AS, resultaba decisivo para el desarrollo del patrón de quetas. La falta de función de algunos de estos genes elimina quetas de posiciones específicas, mientras que su hiperactuación provoca la aparición de quetas extra en posiciones ectópicas.

En nuestro laboratorio del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa realizamos el clonaje y caracterización molecular del C-AS. El complejo comprende cuatro genes que codifican proteínas con el dominio región-básica-hélice-lazo-hélice (bHLH) típico de una familia de reguladores transcripcionales. Dos de esos genes, *achaete* (*ac*) y *scute* (*sc*), son los responsables principales de la generación del patrón de quetas. Hemos denominado a estos (y a otros) genes "proneurales", pues se ha demostrado que confieren a las células que los expresan la capacidad de devenir precursores nerviosos (CMOS).

Mediante hibridaciones *in situ* y tinciones con anticuerpos específicos hemos estudiado la expresión de *ac* y *sc* en los discos imaginales, sobre todo en los discos de ala, que darán lugar a la mayor parte del mesotórax y alas del insecto. Estos dos genes presentan patrones de expresión iguales y se coexpresan en una veintena de sitios. Las células que los expresan constituyen los grupos proneurales; aparecen éstos en posiciones muy re-

producibles de los discos y tienen tamaños y formas característicos.

Junto con S. B. Carroll, de la Universidad de Wisconsin, hemos demostrado que las CMOS nacen dentro de los grupos proneurales. Además, aparecen en posiciones reproducibles dentro de los mismos y se seleccionan de entre las células que poseen mayor cantidad de proteínas ac y sc. Por otro lado, la expresión de *ac* y *sc* fuera de los grupos proneurales, causada por mutaciones o manipulaciones genéticas, origina quetas supernumerarias en posiciones nuevas. Por tanto, la localización de los grupos proneurales y la distribución de niveles de proteína proneural dentro de cada grupo son factores que definen los sitios donde emergen las CMOS y explican, en parte, la posición de las quetas.

Puesto que la expresión de *ac/sc* define los lugares donde aparecen las CMOS, interesa averiguar cómo se genera su patrón de expresión. De acuerdo con nuestros resultados, este patrón se construye pieza a pieza, mediante diversos elementos reguladores de tipo intensificador ("enhancer"), distribuidos a lo largo del ADN del C-AS y que actúan sobre *ac* y *sc*. Cada intensificador es una secuencia de ADN a la que se une una combinación específica de reguladores transcripcionales que activan la transcripción de *ac/sc* en uno o pocos grupos proneurales concretos.

Este modelo de regulación génica que postulamos supone la existencia de un prepatrón de reguladores transcripcionales heterogéneamente distribuidos en el epitelio del disco imaginal. Estamos ahora investigando posibles constituyentes de este prepatrón. Un candidato es el producto del gen *iroquois*, necesario para la activación de *ac/sc* en varios grupos proneurales y que se une por lo menos al intensificador que media la expresión en dos de estos grupos.

Además de *ac* y *sc*, hay otros dos genes que ayudan a definir la posición de las CMOS y, por ende, de las quetas. Uno de ellos es *extramacrochaetae* (*emc*), antagonista de la función proneural. El gen *emc* codifica una proteína HLH que carece del dominio básico que portan casi todos los miembros de esta familia. Las proteínas bHLH forman en general heterodímeros con otros miembros de la familia mediante el dominio hélice-lazo-hélice e interaccionan con el ADN a través de la región básica. La proteína emc forma heterodímeros con las proteínas ac y sc; ahora bien, tales heterodímeros no pueden unirse al ADN al faltar una de las regiones básicas. Por tanto, emc disminuye la concentración efectiva de ac y sc, y puede impedir la función proneural, es decir, la aparición de las CMOS.

Hemos demostrado que las CMOS aparecen justamente en zonas de máxima expresión de *ac* y *sc* y mínima de *emc*. Al modificar las expresiones de estos genes, se alteran el número de las CMOS y disminuye la precisión con que se sitúan. Por tanto, las distribuciones espaciales de ac, sc y emc definen la posición de estos precursores, aunque otros datos indican la presencia de agentes adicionales. También hay que destacar que el C-AS está probablemente implicado en definir aspectos básicos de la morfología del sistema nervioso central del embrión de *Drosophila*, ya que se necesitan sus genes para generar muchos neuroblastos, los precursores de las neuronas.

La caracterización molecular de los genes del C-AS en *Drosophila* ha permitido descubrir genes homológos en vertebrados. Algunos de ellos se expresan durante la neurogénesis temprana. Experimentos de inactivación génica en ratones han demostrado que uno de ellos (*Mash-1*) se requiere para el desarrollo temprano de ciertas neuronas.

Por otro lado, la formación del patrón de CMOS en *Drosophila* y la miogénesis en vertebrados presentan semejanzas en sus mecanismos. Así, los factores de transcripción implicados en esta última (MyoD, Myf-5, MRF4, miogenina) son también miembros de la familia bHLH. Los homólogos del antagonista *emc* en vertebrados, los factores Id, antagonizan la miogénesis. La pérdida de las funciones MyoD y Myf-5 parece eliminar las células precursoras de los músculos esqueléticos, del mismo modo que la falta de *ac* y *sc* causa la ausencia de CMOS. Además, la eliminación de la miogenina en ratones y de *asense* (otro gen del C-AS) en moscas causan defectos en la división y diferenciación de los precursores musculares y neurales, respectivamente.

Estos paralelismos sugieren la conservación entre las moscas y los vertebrados, incluido el hombre, de algunos mecanismos moleculares que promueven la diferenciación de tejidos específicos.

SONSOLES CAMPUZANO,
PILAR CUBAS
Y JUAN MODOLELL
Centro de Biología Molecular
Severo Ochoa, CSIC y UAM,
Madrid

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Aposematismo







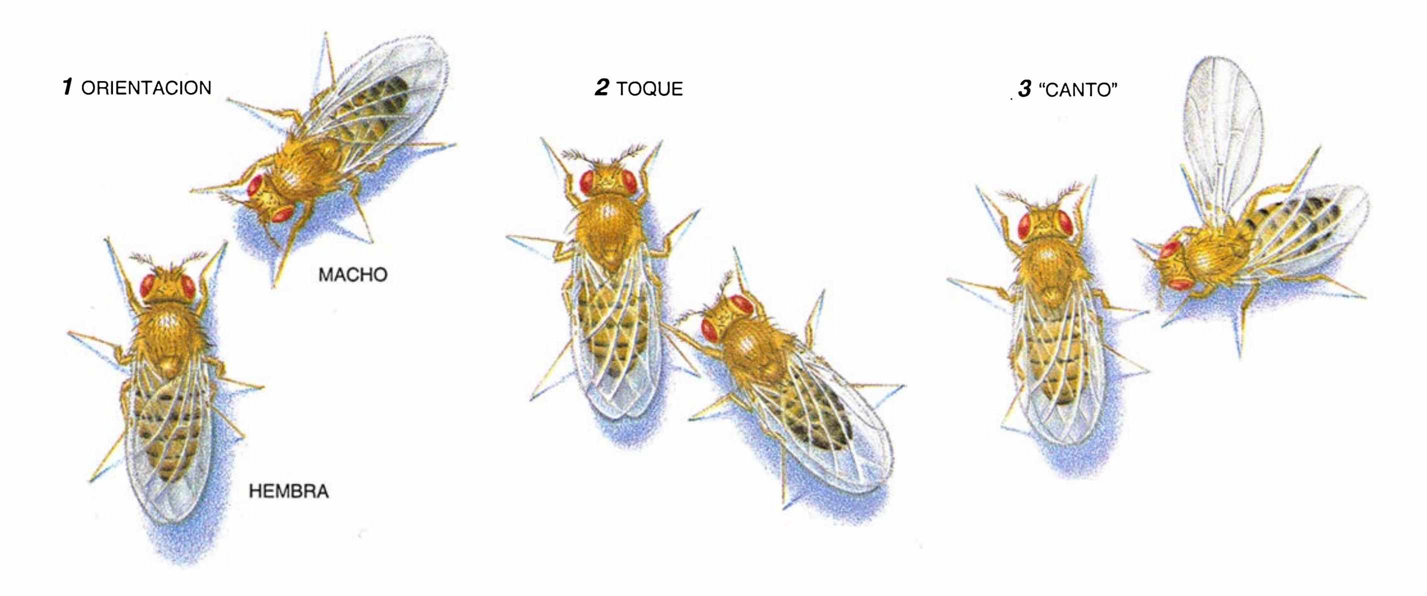
En el mundo tropical los juegos de colores, con sus múltiples significados, están a la orden del día. Llamamos aposemáticas, o advertidoras, las coloraciones rutilantes que, como el rojo, azul, naranja o el amarillo, contrastan con el negro. En su aviso, señalan la toxicidad de su propietario. Aprovechando el papel de "intocable" que otorgan tales libreas, las especies inocuas mimetizan los colores de las tóxicas, beneficiándose de sus efectos disuasorios sobre los predadores.

La familia de las helicónidas viven fundamentalmente en América tropical. Las helicónidas son mariposas de mediano tamaño y brillantes colores aposemáticos, que despliegan en su vuelo perezoso y conspicuo. El patrón de coloración de *Laparus doris* es variable; el color central del ala posterior puede ser rojo, verde, azul o combinaciones distintas de éstos. El de la fotografía grande es de un rojo intenso; la fotografía pequeña es de un lepidóptero de sotobosque, con el denominado patrón de coloración tigre.

Se alimentan de maracuyá y otras pasifloráceas, que contienen alcaloides, de gusto repulsivo y a menudo tóxicos, que adquieren los adultos. El olfato humano detecta a bastante más de siete metros el olor que exhalan estas mariposas —parecido al de los chinches de los vegetales. Las helicónidas descansan en dormideros comunales de árboles y arbustos. Aunque la mayoría de las especies viven en las selvas, ocupan también ambientes abiertos y soleados.

Tomamos las fotografías con flash y teleobjetivos macro de 100 y de 200 mm.

Laparus doris es una mariposa de selva lluviosa con amplia distribución, desde Veracruz en México, hasta América del Sur. La foto se tomó en Bolivia. El lepidóptero de sotobosque de coloración tigre vive en la selva lluviosa de Río Palenque (Ecuador).



Genética del comportamiento

El estudio del cortejo y la cópula en la mosca de la fruta permite comprender la influencia de los genes en el despliegue de comportamientos complejos

Ralph J. Greenspan

Las pistas iniciales sobre el funcionamiento de los mecanismos hereditarios se obtuvieron en los primeros quince años de nuestro siglo. Fue mérito de una disciplina de reciente creación, la genética. Los estudios sobre el color de las flores o la forma de las alas de la mosca de la fruta confirmaban las olvidadas teorías de Gregor Mendel, quien, en 1865, había propuesto que los rasgos físicos pasaban de padres a hijos mediante unidades independientes de material hereditario (o genes, según el nombre acuñado en 1911 para esas misteriosas unidades). Como suele suceder cuando una disciplina emergente tiene sus primeros arrebatos de éxito, todo el mundo empezó a aplicar los nuevos conocimientos con criterios más generales, y a veces menos cuidadosos, para explicar otros fenómenos, sobre todo la conducta humana. Llegó a proponerse incluso que los comportamientos complejos estaban dirigidos por un solo gen.

Sin embargo, ni siquiera los investigadores más tenaces han logrado hasta ahora poder vincular una conducta humana específica a un gen o un grupo restringido de genes. Quizás el fracaso radique en el método. Cuando se trata de la conducta humana, no hay forma de separar tajantemente lo debido a los genes de lo debido a la cultura y la educación. Por otra parte, aun cuando los científicos anulasen los efectos del ambiente y se centraran exclusivamente en los aspectos genéticos de un comportamiento dado, podrían encontrarse con que las premisas de antaño eran incorrectas. Las investigaciones rigurosas, con organismos menos complejos, sugieren que, en la mayoría de los comportamientos, intervienen múltiples genes, algunos de los cuales actuarían de una forma muy sutil.

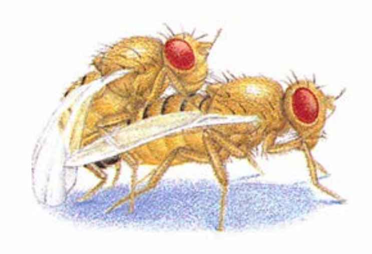
La cuestión sobre la heredabilidad de la conducta humana se planteó ya hace más de un siglo. Francis Galton, pionero en la aplicación de la estadística, se ocupó del tema. En los años ochenta, analizó diversos rasgos físicos y conductuales en padres e hijos. Utilizando el "coeficiente de correlación" que acababa de idear, afirmó que las características del comportamiento eran heredables. Comparó la distribución de los rasgos en diferentes generaciones y llegó a la conclusión de que cada característica era el producto de múltiples aportaciones de material hereditario.

A principios de siglo, con el redescubrimiento de los trabajos de Mendel, ganó adeptos un punto de vista muy diferente. Charles B. Davenport, fundador del laboratorio de Cold Spring Harbor, y otros genéticos llegaron a atribuir a genes singulares características tan etéreas como el talento musical, el humor o la "debilidad mental". En 1921, por ejemplo, Davenport afirmó que "según se desprende de los abundantes árboles genealógicos analizados, la deficiencia mental de grado medio o superior se hereda a la manera de un carácter recesivo simple". A pesar de sus puntos de vista divergentes sobre los mecanismos hereditarios, Galton y Davenport extrajeron conclusiones similares, y arriesgadas, de sus observaciones. Galton, creador del término "eugenesia", se convirtió en un ardiente defensor de los procesos de mejora de la raza humana mediante emparejamientos selectivos entre personas con rasgos favorables. Davenport apoyó con vehemencia esa práctica.

En los años veinte se realizaron, con perros, algunos de los primeros experimentos diseñados para determi-







1. EL MACHO CORTEJA a una mosca hembra ejecutando una secuencia programada de actos. En las primeras etapas, se orienta hacia la hembra (*1*), cuyo abdomen golpea con una pata delantera (*2*); a continuación, despliega un ala y la hace vibrar para producir un "canto amoroso" (*3*); acto seguido, lame los órganos genitales de su pareja (*4*), intenta montarla (*5*) y, finalmente, copula con ella (*6*). El análisis de esta secuencia sugiere que la contribución genética al comportamiento es sutil.

nar la influencia de los genes en el comportamiento. Entre otras características, se analizaban las conductas de "parada" (para mostrar la localización de una presa) y "canto" durante la caza.

Las razas caninas divergen en su comportamiento tanto como en su aspecto. En los primeros ensayos se cruzaban perros que diferían en alguna peculiaridad del comportamiento; a continuación, se cruzaban sus descendientes entre sí. Si un carácter determinado del comportamiento estuviese controlado por uno o pocos genes, cabría esperar que los individuos de la última generación se agruparan en tres tipos: un grupo cuyo comportamiento se pareciera mucho al de la madre, otro muy parecido al del padre y un tercer grupo de comportamiento intermedio. Pero si intervinieran muchos genes, no habría en la descendencia grupos acotados, sino un amplio abanico de tipos de comportamiento muy diversos. Los resultados obtenidos se mostraron acordes con esta última pauta, prueba de que, tras cada carácter, se escondían varios genes. Se obtuvieron resultados similares en experimentos realizados con ratas de laboratorio.

Esos ensayos, aunque suministraban bastante información, tenían grandes limitaciones. Con los experimentos de cruzamiento no podemos abordar la base genética de unas pautas de conducta que apenas si varían de un miembro a otro de la misma especie. Para profundizar en este y otros problemas, había que identificar los genes implicados en la conducta. Una tarea que no podía acometerse con las técnicas de entonces.

Descifrada en 1953 la estructura del ADN, en los años sesenta empezaron a caer los obstáculos técnicos que se oponían a la disección genética del comportamiento animal. Los estudios con microorganismos revelaron que los genes cifran proteínas: la activación de un gen da lugar a la síntesis de la proteína determinada. Esta proteína, a su vez, desempeña alguna función necesaria para el organismo, como colaborar en la formación y operación del sistema nervioso (del cual depende, en última instancia, el comportamiento). Se dilucidaron también las etapas seguidas en la síntesis de proteínas y, en los años ochenta, se sentaron las bases para el desarrollo de herramientas que permiten aislar los genes uno por uno y establecer las funciones de sus correspondientes proteínas.

Seymour Benzer intervino de forma destacada en la demostración de que los genes son segmentos lineales de ADN. A mediados de los sesenta había apostado también por no restringir los genes a los caracteres físicos. En una serie de ensayos con la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*), comenzó a identificar genes que afectaban al comportamiento. Esta tarea continúa en diversos centros, en particular en el laboratorio de Jeffrey C. Hall, uno de los primeros colaboradores de Benzer en este nuevo campo. Nuestro grupo de la Universidad de Nueva York cultiva también esta línea de investigación, en la que me inicié con Hall hace unos veinte años.

Una de las conductas que han recibido mayor atención es la que la mosca parece hacer mejor: el cortejo. Este proceso consta de una serie de acciones, todas ellas acompañadas de un intercambio de señales visuales, acústicas y quimiosensoriales entre el macho y la hembra. El macho, por ser el bailarín más activo en este complicado ballet, ha acaparado el interés de los estudiosos.

El ritual comienza con la fase de orientación. El macho se coloca frente a la hembra, a unos 0,2 mm de distancia, le golpea ligeramente el abdomen con una de las patas delanteras, y sigue tras ella si se retira. Extiende luego un ala y la agita para ejecutar una suerte de "canto amoroso". Según el nivel de interés mostrado por la hembra en este punto, volverá o no a reiterar el proceso. Si todo marcha bien, despliega su probóscide (aparato bucal en forma de trompa) y lame los órganos genitales de la hembra. A continuación la monta y, si está receptiva, copulan. No hay apareamiento a menos que los machos hayan realizado el ritual completo y la hembra se haya mostrado receptiva. La violación es poco frecuente en el mundo de las moscas de la fruta.

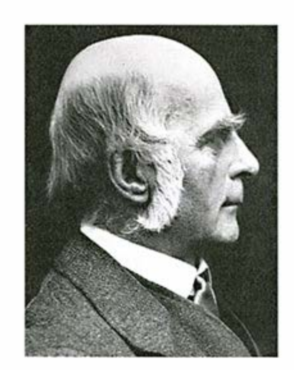
Como primer paso para encontrar los genes implicados en el cortejo, Hall se propuso identificar las partes del sistema nervioso central que controlan cada paso en el proceso de cortejo. Para ello, creó unas moscas extraordinarias, denominadas mosaicos genéticos, que portan, mezcladas, células del macho y de la hembra.

La técnica se basaba en la biología del desarrollo sexual de las moscas de la fruta. En los embriones, el desarrollo sexual está controlado por el número de cromosomas X presente en cada célula. Las células que tienen un solo cromosoma X determinan la formación de estructuras anatómicas masculinas y un comportamiento masculino en la mosca adulta. Las células que portan dos cromosomas X determinan características femeninas, en su morfología y conducta. Tales diferencias se deben a que las células con un único cromosoma X (machos) y dos cromosomas X (hembras) activan series distintas, aunque en ciertos puntos coincidentes, de genes implicados en la orientación se-

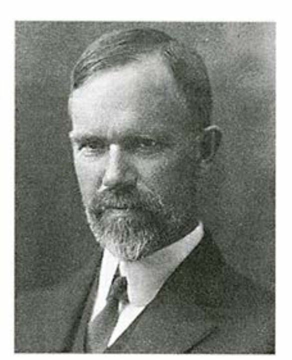
RALPH J. GREENSPAN es catedrático de biología y neurociencias en la Universidad de Nueva York, y director del laboratorio W. M. Keck de Neurobiología Molecular.

Teorías precursoras sobre el comportamiento humano

Durante el primer cuarto del siglo XX, se enfrentaron dos puntos de vista antagónicos sobre la unicidad o multiplicidad de genes implicados en la determinación del comportamiento. A finales del siglo pasado, Francis Galton, uno de los padres de la estadística, afirmaba que los rasgos humanos, la manera de comportarse incluida, estaban controlados por multitud de esas unidades hereditarias que, andando el tiempo, se llamarían genes. En cambio, Charles B. Davenport, genético de reconocido prestigio, habría de sostener más tarde que cada carácter estaba controlado por un gen. En nuestros días, los estudios sobre moscas de la fruta y otros animales ofrecen una visión del problema más próxima a las ideas de Galton. La fama que conservan hoy Galton y Davenport obedece, sin embargo, a su vehemente defensa de la eugenesia, que en palabras del propio Galton significa controlar la "natalidad de los ineptos" y mejorar la raza humana "favoreciendo la reproducción de los más aptos". Galton introdujo este término a finales del siglo XIX. Davenport fundó un centro de investigación sobre eugenesia humana en el laboratorio de Cold Spring Harbor.



Francis Galton



Charles B. Davenport

xual. Hall sabía que, si las moscas formadas principalmente por células de hembra, pero con células de macho en determinados centros cerebrales, se comportaban como machos en alguna fase del cortejo, ello podría deberse a que en ese sitio del cerebro se estaba produciendo un patrón masculino de expresión génica.

Una vez constituidos los mosaicos, registraba el comportamiento de los portadores en el cortejo. A continuación, congelaba las moscas (de 1,5 mm de longitud) y las seccionaba en 20 finos cortes, observando en cada uno de ellos —merced a una ingeniosa técnica de tinción— la distribución de células procedentes del macho o de la hembra. Un experimento exasperante en aquellos años setenta, si tenemos en cuenta que no había dos individuos con idéntica distribución de células del macho y de la hembra. Cada mosca debía sobrevivir a una batería de pruebas de comportamiento, y había que analizar las 20 secciones. La exclusividad de cada individuo significaba que el experimentador carecía de una segunda oportunidad.

Tras examinar gran número de esos mosaicos, Hall llegó a la conclusión de que el comienzo del cortejo (orientación hacia la hembra, golpecitos en el abdomen, seguimiento y despliegue del ala) requería la presencia de células de macho en una región relativamente pequeña de la parte póstero-superior del cerebro; esa zona integra señales procedentes de diversos sistemas sensoriales de la mosca. Es decir, las células de macho presentes en dicha zona desencadenan un mecanismo de cortejo propio de los machos, ausente en las hembras. Las etapas posteriores del cortejo, en particular las que exigen una coordinación motora precisa, requieren la presencia de tejidos de macho en otros lugares del sistema nervioso. Por ejemplo, para realizar un "canto" de cortejo adecuado, las moscas deben tener células masculinas en la zona de arranque antedicha y en otras partes del ganglio torácico (equivalente a la médula espinal de los vertebrados).

Nuestro grupo ha identificado la región del cerebro implicada en la determinación de la preferencia sexual en la mosca de la fruta. Nuestro descubrimiento se produjo de modo casual, cuando Jean François Ferveur creó estirpes de moscas con mosaico, principalmente machos, aunque portaban células de hembra en ciertas áreas del cerebro. Antes de estudiar el comportamiento de cortejo de esos insectos, quisimos comprobar si unos machos perfectamente desarrollados tomaban por hembras a nuestros individuos con mosaico. No las reputaron como tales; mas, para nuestra sorpresa, algunas estirpes mostraban un comportamiento poco corriente: cortejaban por igual a machos y hembras.

El estudio de los cerebros de tales insectos insólitos, realizado en colaboración con Klemens F. Störtkuhl y Reinhard F. Stocker, de la Universidad de Friburgo, puso de manifiesto que la discriminación sexual se alteraba cuando poseía características femeninas alguno de los dos centros cerebrales siguientes: el lóbulo de la antena o el cuerpo pedunculado ("mush-room body"). Ambas regiones, la segunda de las cuales está próxima a la zona de arranque del cortejo, participan en el procesamiento de las señales olfativas. Si alguno de estos centros de análisis de los olores, o los dos, proceden de hembra, la mosca pierde su capacidad para distinguir entre machos y hembras, de modo que se muestra igualmente interesada por ambos sexos.

La implicación de esa pluralidad de regiones del sistema nervioso central del macho en el cortejo abona también la hipótesis de la participación de muchos genes en el proceso. Se han descubierto ya más de una docena, principalmente en el laboratorio de Hall. El gen *fruitless*, por ejemplo, condiciona la preferencia sexual. Una mutación en el mismo afecta a los machos en idéntico sentido que si portasen células de hembra en el lóbulo de la antena o en el cuerpo pedunculado: cortejan a otros machos con tanto afán como a las hembras. Este gen es también esencial para las últimas fases del cortejo, pues los machos que portan un gen mutado nunca intentan copular con las hembras.

El panorama que comienza a perfilarse es, por tanto, más congruente con la tesis de Galton que con la de Davenport. Por extraño que parezca, ninguno de los genes implicados que se han identificado hasta la fecha limita su actuación al cortejo. Existen cada vez más datos a favor de que la explicación acertada no coincide ni con la de Galton ni con la de Davenport. La mayoría de los genes que intervienen en el cortejo (y otras pautas de comportamiento) podrían cumplir más de una función en el organismo. Y a su vez, machos y hembras pueden apoyarse en los mismos genes para fines diferentes.

Veamos un ejemplo. Se conocen tres genes que intervienen en el canto de cortejo del macho. Uno de ellos, *period*, lo han estudiado Hall y Charalambos P. Kyriacou, quienes decidieron examinarlo tras descubrir, en 1980, que el canto del macho tenía

un ritmo característico. Por las investigaciones de Ronald J. Konopka, sabían ya que ese gen respondía de los ritmos circadianos de *D. melanogaster*: ciclos repetitivos, como el de sueño y vigilia, que son característicos de todos los seres vivos.

¿Intervendría también *period* en el ritmo del canto de cortejo? El sonido emitido al batir las alas resulta poco musical a nuestros oídos, pero sigue un patrón detectable. Cuando el insecto sube y baja el ala una vez, el movimiento produce un sonido característico, o pulso, que puede registrarse con un aparato adecuado. Durante unos 27 segundos, el macho va dilatando gradualmente el intervalo entre pulsos. Luego, durante otros 27 o 28 segundos, acorta, también de forma paulatina, el intervalo. Y así, cuando se representan los intervalos en función del tiempo se obtiene una curva sinusoidal regular.

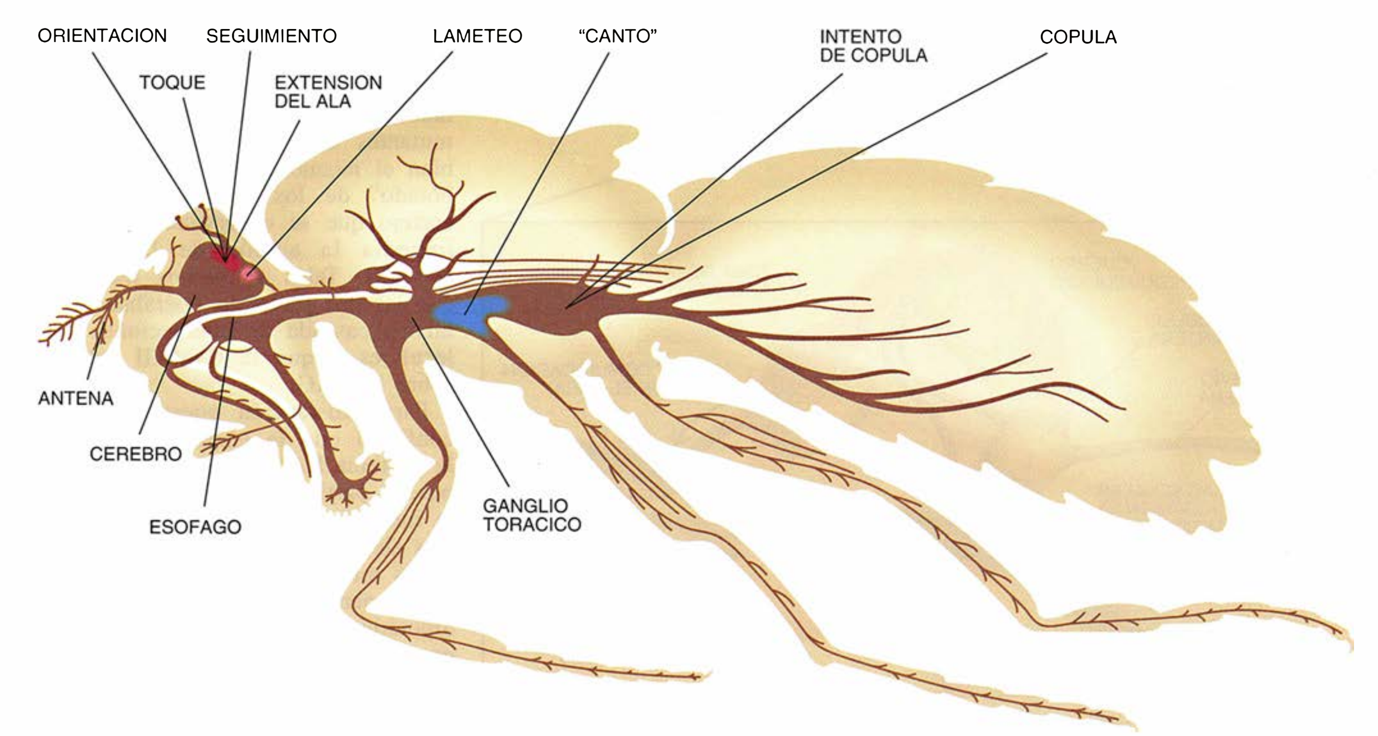
Hall y Kyriacou observaron que los machos que portan un gen *period* normal emiten un sonido rítmico, que despierta una mayor receptividad de las hembras. Los machos con un gen *period* inactivo, en cambio, generan un sonido sin rítmica, menos eficaz, por lo que se ve, a la hora de estimular a las hembras. Si exponían hembras solas, unas a sonidos normales y otras a sonidos arrítmicos, simulados ambos por ordenador, y se las mezclaba luego con machos, las hembras sujetas a los sonidos aberrantes se mostraban menos receptivas ante las insinuaciones de aquéllos. Algunas mutaciones menos drásticas en ese gen mantienen el ritmo, pero alargan o estrechan la sinusoide, y merman también la eficacia del canto.

La finura del efecto del gen *period* sobre el despliegue del cortejo, y sobre el propio canto, añade crédito a la idea según la cual el cortejo, y otras pautas complejas de comportamiento, está regulado por muchos genes que actúan de forma conjunta. Además, el hecho de que el gen *period* participe en la regulación de otros relojes biológicos y se exprese en diferentes partes del sistema nervioso central, apoya la tesis de que cualquier gen considerado podría condicionar más de un tipo de comportamiento.

Hall, Kyriacou y Michael Rosbash acaban de acotar la porción exacta del gen que controla el ritmo del canto. Se trata de una pequeña región de la parte central; el resto del gen controla otros ritmos. Se llegó a esa división del trabajo a través, en buena medida, de otra mosca, de la especie *D. simulans*, que tiene el mismo ciclo de 24 horas de actividad y descanso que *D. melanogaster*; aquélla, sin embargo, ejecuta un canto que difiere en los intervalos entre pulsos. El gen *period* de ambas especies es similar, salvo unas pequeñas diferencias en la región central. Mediante manipulación por ingeniería genética se han obtenido moscas que portan un gen *period* híbrido, resultante de reemplazar la región central del gen de *D. melanogaster* por el correspondiente segmento de *D. simulans*; los machos híbridos cantan como los de *D. simulans*.

Aunque la preferencia sexual y el cortejo están programados en la mosca de la fruta, machos y hembras tienen la posibilidad de modular su actividad en respuesta a una reacción del otro; pueden, pues, aprender. Y así como la capacidad para realizar el cortejo está dirigida por genes, también lo está la capacidad para aprender de la experiencia. Los estudios de este fenómeno refuerzan aún más la idea de que el comportamiento está regulado por la interacción de una miríada de genes, cada uno de los cuales desempeña diversas funciones en el organismo.

Una de las cosas que el macho aprende durante el cortejo es a no perder el tiempo con una hembra ya



2. CENTROS DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL (*castaño*) que controlan las etapas del cortejo en los machos de la mosca de la fruta. Estos centros se han cartografiado utilizando moscas constituidas con mezcla de células procedentes de macho y de hembra. Para realizar las primeras etapas del cortejo (orientación, toque y extensión del ala) y para seguir a las hembras, las moscas deben tener células de macho en una pequeña "zona de arranque" (*rojo*), situada en la parte posterior del cerebro. También necesitan células de macho en un sitio próximo (*rosa*) para el acto de lamer, en determinada zona del ganglio torácico (*azul*) para producir sus sonidos y en muchas secciones diferentes del ganglio torácico para copular.

montada y, en consecuencia, no receptiva. Hall y Richard W. Siegel, de la Universidad de California en Los Angeles, observaron que los machos cortejan tenazmente las hembras vírgenes, pero pierden el interés por las hembras ya montadas después de 30 minutos o una hora, cuando por fin quedan impregnados por una feromona inhibidora emitida por las futuras madres. Una vez que los machos renuncian a la persecución, dejan de interesarse por cualquier hembra, virgen o no, durante algunas horas. Desde el punto de vista de la lógica evolutiva, ello podría atribuirse a que la presencia de una hembra montada en un grupo de hembras señale que la mayoría de ellas, si no todas, también lo han sido ya, por lo que el macho hará bien en invertir sus energías en otros gineceos.

Mis escarceos en las bases genéticas de esta respuesta comenzaron hace unos años, en colaboración con Leslie C. Griffith. Se sabía ya que la quinasa II dependiente de calcio y calmodulina (CaMKII) contribuía a registrar los efectos de la experiencia en las neuronas, induciendo cambios moleculares de probable importancia decisiva para el aprendizaje. Por ello, decidimos comprobar si los machos de la mosca de la fruta necesitaban esa enzima y, por tanto, su correspondiente gen, para responder adecuadamente a las hembras ya montadas.

Como primer paso, Griffith creó una estirpe de mosca cuya proteína *CaMKII* podía silenciarse (inactivarse) con sólo elevar la temperatura corporal. Y observamos que, cuando la actividad de la enzima remitía, aunque fuera ligeramente, los machos de esa estirpe se comportaban de una manera extraña. Durante el cortejo, se mostraban tan ávidos de hembras vírgenes como los machos normales, y perdían el interés por las hembras montadas tras la hora acostumbrada, pero parecían olvidar su rechazo casi inmediatamente. Si se colocaban junto a otras hembras poco después de haber estado con una ya montada, reiniciaban su persecución. Cuando inhibíamos aún más la proteína, los machos no aprendían nada en absoluto: perseguían sin tregua, durante horas, a las hembras ya montadas.

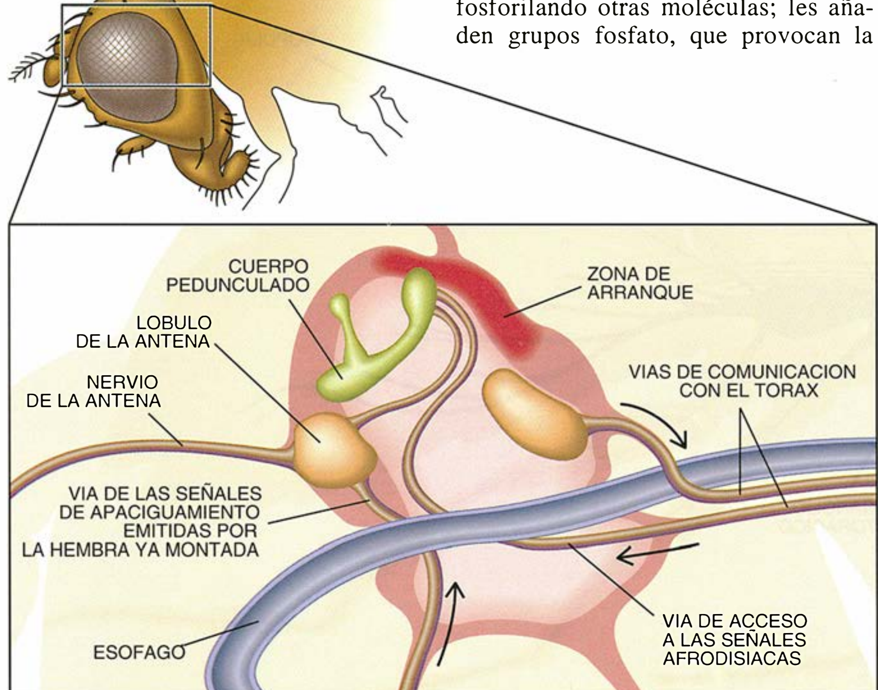
Una vez demostrado que el gen *CaMKII* participaba, a través de su enzima correspondiente, en el aprendizaje durante el cortejo, había que averiguar el modo en que colabora la enzima en el registro de la experiencia. Todas las quinasas actúan fosforilando otras moléculas; les añaden grupos fosfato, que provocan la activación o inactivación de la molécula diana. Ahora bien, ¿cuál era la diana de la quinasa en las neuronas? ¿Qué sucedía una vez fosforilada? Esas preguntas nos llevaron finalmente a demostrar que un segundo gen expresado en las neuronas, el gen *eag*, opera también en el proceso de aprendizaje.

El producto proteínico del gen *eag* es un componente de ciertos canales de membrana que regulan el flujo de iones potasio hacia el exterior de las neuronas. La apertura de esos canales ayuda a controlar la excitación y la liberación de neurotransmisores, moléculas encargadas de llevar mensajes de una célula a otra. El nombre de este gen deriva de un fenómeno observado ya en los años sesenta; cuando se anestesiaban las moscas portadoras de genes *eag* mutados, movían las patas; en la onda de la moda del tiempo, los descubridores bautizaron el gen con la denominación "*éter a gogó*".

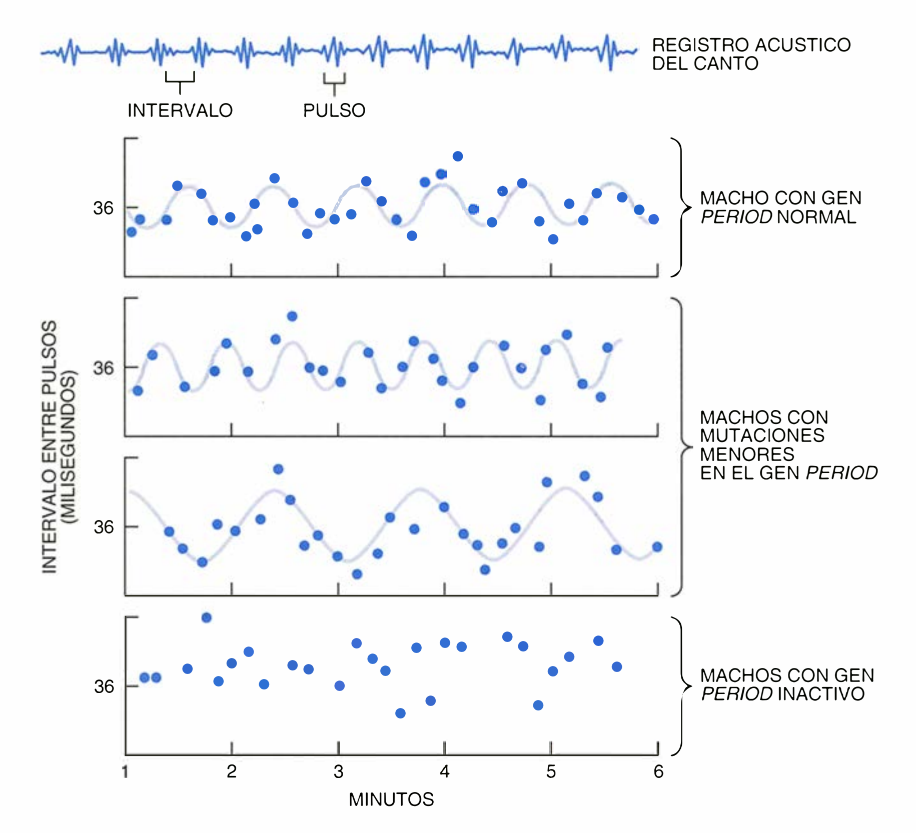
Por pistas que habíamos ido recogiendo, y por otras que Jing Wang y Chun-Fang Wu habían encontrado, Griffith y yo comenzamos a pensar que la enzima CaMKII podría participar en el aprendizaje modificando la proteína EAG en los canales de potasio. A este respecto, el grupo de Eric R. Kandel había demostrado en el molusco *Aplysia* que, durante un proceso de aprendizaje elemental, una quinasa modificaba ciertos canales de potasio. Por nuestro lado, hallamos que algunas formas mutantes de la proteína EAG exhibían el mismo comportamiento "embotado" de los machos durante el cortejo que se observaba cuando se impedía la acción de la enzima CaMKII. Tales datos nos indicaban que las dos proteínas operaban en la misma cascada de interacciones moleculares y que la CaMKII actuaba sobre la EAG.

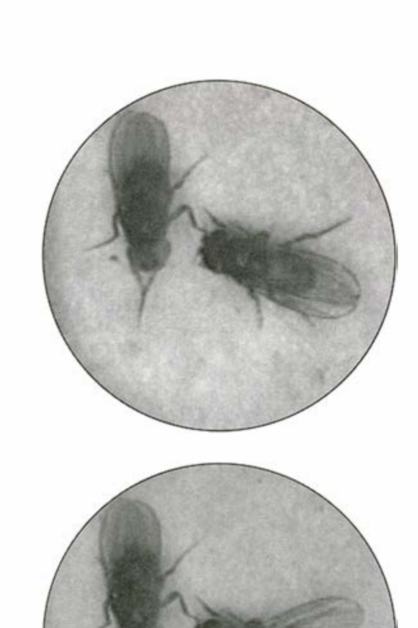
Para satisfacción nuestra, Griffith confirmó que la enzima modificaba la proteína EAG, *in vitro* por lo menos. A partir de tales hallazgos y de la información extraída de los registros eléctricos de las sinapsis de animales mutantes, nos sentimos autorizados para proponer una secuencia hipotética de reacciones moleculares que explicaría el aprendizaje de renuncia a las hembras ya montadas.

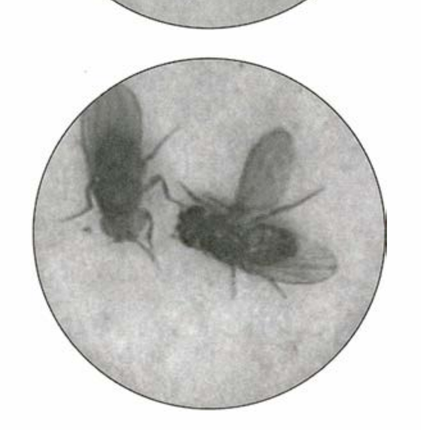
En primer lugar, la exposición de los machos a feromonas antiafrodisíacas, mientras están cortejando a hembras ya montadas, estimula unos sistemas sensoriales que llegan a la zona de arranque del cerebro. En virtud de esa estimulación, se produce



3. EL CENTRO DE ATRACCION por las hembras reside en dos sitios del cerebro de la mosca macho (*representación esquemática*): el lóbulo de la antena (*amarillo, a la izquierda*); el otro es el cuerpo pedunculado (*verde*), situado junto a la zona de arranque responsable del comienzo del cortejo. Se descubrió la importancia de esas regiones al ver que ciertas estirpes de machos, genéticamente manipuladas para que presentaran células de hembra en cualquiera de esos sitios, cortejaban por igual a machos y hembras.







4. EL MACHO DESPLIEGA UN ALA (*secuencia fotográfica de la derecha*) antes de hacerla vibrar para producir un sonido o "canto" particular. En el "canto" normal, los intervalos entre pulsos (*registro acústico en la parte superior*) aumentan gradualmente durante unos 27 segundos y después se acortan, poco a poco también. La representación de los intervalos produce una curva sinusoidal (*curva superior*), cuyo ritmo está controlado por el gen *period*. Las moscas que portan un gen *period* normal emiten un canto normal; las que portan un gen ligeramente defectuoso producen ritmos anormales (*curvas centrales*), y las que tienen un gen inactivo producen un canto arrítmico (*abajo*).

un aumento local de la concentración de calcio en las células que promueven el apetito sexual durante el cortejo. Ese incremento activa la proteína CaMKII, que, a su vez, fosforila la proteína EAG en los canales de potasio que portan el polipéptido. Tales modificaciones inducen la apertura del canal, que favorece el flujo de potasio hacia el exterior de las neuronas, proceso que desactiva las células y reduce su capacidad para liberar neurotransmisores. Este apaciguamiento de las células provoca el desinterés de los machos por la cópula. Al parecer, las moscas que portan defectos en los genes responsables de cualquiera de esas proteínas mantienen el interés por las hembras ya montadas porque los canales de potasio permanecen cerrados en las células críticas, posibilitando que las neuronas se tornen hiperactivas.

Los genes *CaMKII* y *eag* son sólo dos de los varios genes conocidos que intervienen en el aprendizaje y la memoria de *D. melanogaster*. Otros participan también en el cortejo, lo que encaja con la idea de que los comportamientos dependen de la interacción de amplias redes de genes, la mayoría de los cuales participan en múltiples aspectos de la biología de un organismo.

¿Tienen alguna consecuencia para el hombre estas lecciones extraídas de los estudios genéticos con moscas? En mi opinión, sí, dentro de ciertos límites. Existen razones fundadas para suponer que las influencias genéticas sobre el comportamiento son, en las personas, tanto o más complicadas que en las moscas. Podría, pues, aplicárseles la hipótesis de muchos genes multifuncionales, cada uno de los cuales aporta su minúsculo grano de arena. Probablemente, muchos de los productos génicos que funcionan en los cerebros de las moscas revestirán parejo interés en el cerebro humano. Ya se han descubierto los equivalentes humanos de varios genes identificados en la mosca, como el eag. A medida que se vayan acotando otros, conoceremos mejor las interacciones moleculares en que se basa el sistema nervioso central para inducir este o aquel comportamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INHIBITION OF CALCIUM/CALMODULIN-DEPENDENT PROTEIN KINASE IN *DROSOPHILA* DISRUPTS BEHAVIORAL PLASTICITY. L. C. Griffith et al. en *Neuron*, vol. 10, n.º 3, págs. 501-509, marzo de 1993.

THE MATING OF A FLY. J. C. Hall en *Science*, vol. 264, págs. 1702-1714, 25 de marzo de 1994.

CALCIUM/CALMODULIN-DEPENDENT PROTEIN KINASE II AND POTASSIUM CHANNEL SUBUNIT EAG SIMILARLY AFFECT PLASTICITY IN *DROSOPHILA*. L. C. Griffith et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, n.º 21, págs. 10044-10048, 11 de octubre de 1994.

GENETIC FEMINIZATION OF BRAIN STRUCTURES AND CHANGED SEXUAL ORIENTATION IN MALE *DROSOPHILA MELANOGASTER*. J.-F. Ferveur et al. en *Science*, vol. 267, páginas 902-905, 10 de febrero de 1995.










La computadora del historiador del arte

Algunos problemas planteados por antiguas obras de arte se desvanecen ante los análisis históricos y las investigaciones electrónicas

Lillian Schwartz

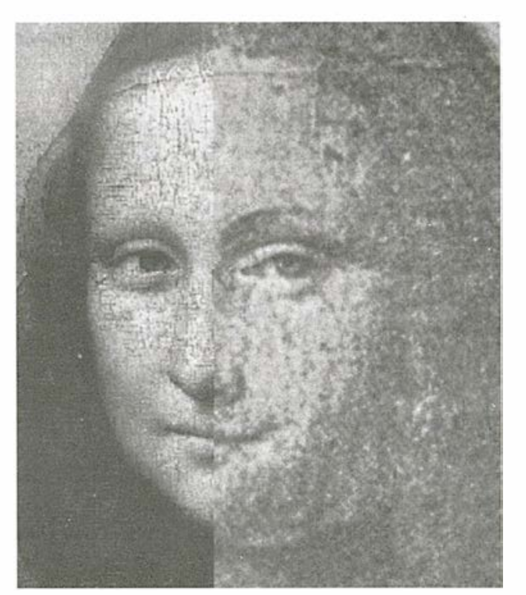
Hace ocho años, Gerald Holzmann y yo pusimos a prueba un programa para someter las imágenes a reflexiones especulares, cambios de escala y yuxtaposiciones. Con anterioridad había examinado ya a fondo muchas imágenes, entre ellas el autorretrato de Leonardo da Vinci y su *Monna Lisa*. Las dos caras están representadas en vistas de tres cuartos, pero miran en sentido opuesto. Reflejamos especularmente el autorretrato y cambiamos la escala de las dos imágenes de suerte que, en ambas, fuese igual la distancia interpupilar. Partimos entonces las imágenes en dos y alineamos la punta de la nariz antes de yuxtaponer ambas mitades.

A medida que la imagen compuesta se iba formando pantalla abajo, se fundían las líneas del cabello; frente y arcos superciliares mostraban un extraordinario parecido. Cuando surgieron los ojos, las pupilas se situaron a una misma altura; por último, los pómulos, la nariz y la boca casaron también con precisión.

La semejanza de ambos retratos se confirmaba con otros detalles. La distancia entre lagrimales, una de las características distintivas del rostro, coincidió con una precisión del 98 %. El arco superciliar prominente —presente en más del 90 % de los varones— se distingue perfectamente tanto en el retrato de Leonardo como en la *Monna Lisa*. Ninguno de estos rasgos coincide con los de un dibujo anterior, considerado boceto de la *Monna Lisa* y que guarda, en cambio, gran parecido con otro que se esconde, como demuestra el análisis radiográfico, bajo el cuadro.

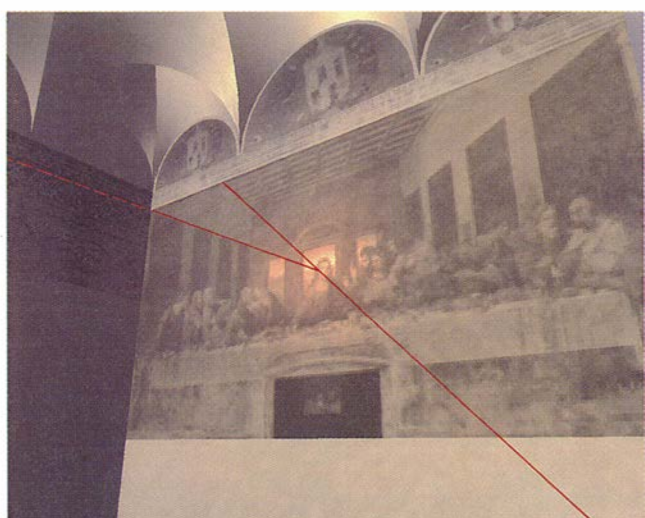
A finales del siglo XV, Leonardo dejó Milán llevando su bosquejo de la *Monna Lisa*, en el que siguió trabajando durante años. Tenía consigo el cuadro cuando murió, en 1519. En mi opinión, para completar la obra en ausencia de la retratada, Leonardo se sirvió de sí mismo como modelo y dotó al retrato de sus propios rasgos. Empleó su nueva técnica de sombreado, el *sfumato*, para combinar o reemplazar algunas partes del rostro del modelo original con sus propios rasgos.

Con su pasión por los enigmas, nos ofreció la que quizá sea una de las pistas más importantes: los patrones de hojas de trébol entrelazadas sin solución de continuidad que se aprecian en el escote del vestido de *Monna Lisa*. "Podemos tener la certeza de que no están ahí por casualidad", escribió Roy McMullen. A Leonardo le apasionaban los dibujos entrelazados y una vez adoptó un diseño de cestería similar para adornar su nombre. Teniendo en cuenta que el mim-



1. YUXTAPOSICION DE IMAGENES de la *Monna Lisa* y Leonardo de Vinci (*página opuesta*), que revela la unidad de un solo rostro. Cuando se refleja en el espejo el autorretrato de Leonardo y se cambia su escala, los labios, las cejas, los pómulos y la forma de la cabeza coinciden con los de la *Monna Lisa*. Estas similitudes dan a entender que Leonardo, al trabajar en la *Monna Lisa* en ausencia de la retratada, se sirvió de sí mismo como modelo y dotó al retrato de sus propios rasgos. Isabel, duquesa de Aragón, pudo ser originalmente la retratada (según Vasari, la modelo fue Monna Lisa Gherardini. Leonardo había hecho un cartón que la retrataba y cuya composición era igual a la de la *Monna Lisa*. El cartón, sin embargo, no casa con la pintura acabada, como muestra la imagen compuesta de arriba. A pesar del parecido superficial, los ojos, la nariz y la mandíbula son diferentes. El cartón de Isabel sí coincide con un bosquejo que se encuentra debajo de la *Monna Lisa*, como se ha puesto de manifiesto mediante análisis por rayos X. Una metamorfosis por ordenador (*izquierda*) transforma el adusto Leonardo en la sonriente *Monna Lisa* con sólo suprimir las arrugas y la barba y elevar las comisuras de los labios. Los pronunciados arcos ciliares y la posición de los ojos no cambian.





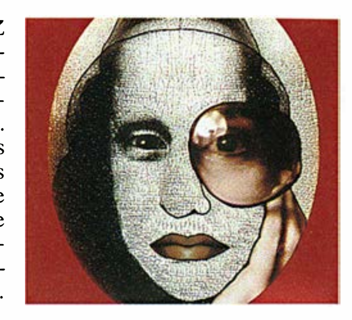


2. *LA ULTIMA CENA*, de Leonardo. Este fresco del siglo XV, que se halla en el refectorio de Santa Maria delle Grazie, de Milán, muestra a Cristo cenando en una sala que parece una extensión del comedor de los frailes (*recreación por ordenador, arriba*). Leonardo dibujó en las largas paredes de la sala unas cenefas alineadas con la parte superior de las colgaduras del fresco, a fin de crear un poderoso efecto óptico, que sólo se produce si se contempla la obra a unos cinco metros sobre el suelo. Los visitantes, pues, no perciben la ilusión. La recreación por ordenador (*abajo a la izquierda*) revela que quien viera el fresco desde un lateral o entrase por la puerta original, hoy tapiada, percibiría que la *Cena* tiene lugar en el refectorio: el borde superior de las colgaduras conduce el ojo del observador hacia la mano de Cristo, que, a su vez, le muestra el auténtico refectorio.

bre usado en cestería se llama *vinco* en italiano, la conexión entre *vinci* y *vinco* podría revelar la identidad del modelo de la *Monna Lisa*: el propio Leonardo.

Algunos años después, otro problema planteado por una obra de Leonardo atrajo mi atención. Los estudiosos han debatido largamente si convendría elevarse para contemplar el fresco de la *Ultima Cena*, en el refectorio de Santa Maria delle Grazie, en Milán. Leonardo pintó colgaduras en el fresco y bandas con dibujos en las paredes adyacentes del refectorio, pero sólo aparecen alineados si se mira el cuadro desde una altura de cinco metros con respecto al suelo. Da la impresión de que Leonardo quiso que el fresco pareciese una extensión del refectorio. Pero la ilusión no funciona.

LILLIAN SCHWARTZ (*autorretrato a la derecha*) pertenece a la primera generación de creadores de arte por ordenador. Su obra se expone en las principales colecciones del mundo. Miembro de la Academia Mundial de Artes y Ciencias, es coautora del libro *The Computer Artist's Handbook*.



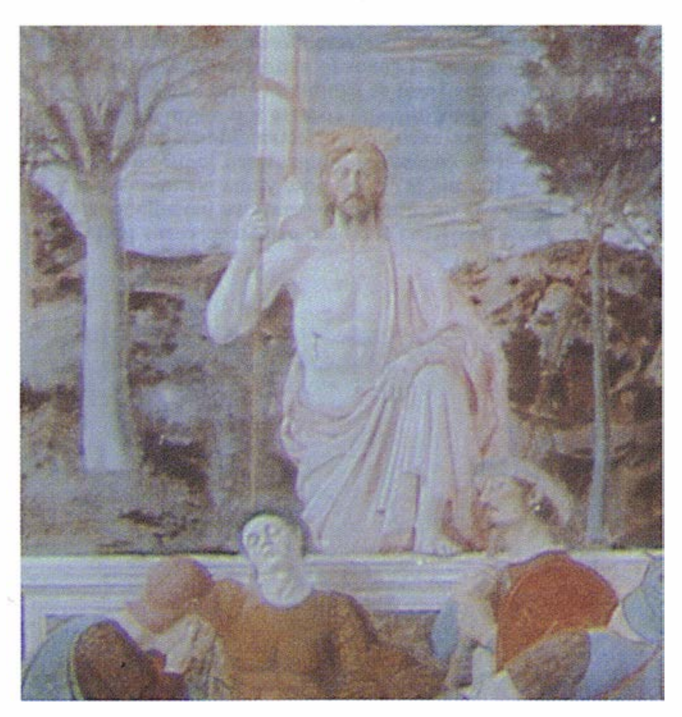
Construí en el ordenador, para poder verla desde distintos sitios, una sala tridimensional basada en la del fresco. En vez de una verdadera perspectiva lineal, Leonardo usó una acelerada, común en escenografía teatral. Al crear la pintura, colocó en el frontal, como si dispusiera un decorado, a Cristo y los Apóstoles, inclinó el suelo y la mesa y pintó unas paredes laterales de longitudes diferentes, con colgaduras de distintos tamaños, desigualmente espaciadas.

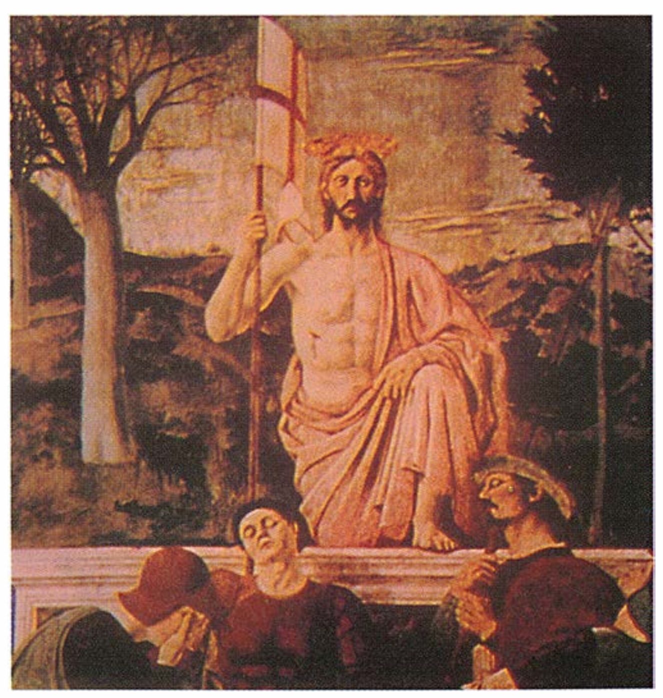
Encontré que hay otras posiciones en el refectorio desde las cuales las líneas de los dibujos sí empalman suavemente con las líneas de las colgaduras. A un lado del fresco, a unos cinco metros y medio, se encontraba antaño la puerta principal del refectorio, hoy tapiada. Para cualquiera que entrase en la sala, la primera impresión obtenida del cuadro es que la cena tenía lugar en el refectorio y la mano extendida de Cristo le invitaba a entrar. Al ver la pintura desde los lados —ése era claramente el propósito de Leonardo—, los frailes, sentados para comer ante unas mesas dispuestas a lo largo de las paredes laterales del refectorio, sentirían que Cristo les acompañaba mientras tomaban sus alimentos. En la recreación por ordenador, pude también mostrar los pies de Cristo (destruidos por una puerta que se abrió más tarde en el fresco, pero que conocemos por una copia anterior): aparecen suspendidos sobre el suelo, en una postura que prefigura la crucifixión.

Hace poco, Patricia Trutty-Coohill me hizo volver a la obra de Leonardo, esta vez a sus 700 grotescos. ¿Fueron sólo fruto de su imaginación o los copió del natural? Muchos historiadores del arte se han mostrado perplejos ante estas caras estrafalarias que parecen distar mucho del canon de proporciones que Leonardo había establecido para dibujar rostros.

Al medir los rasgos y sus alineamientos, me sorprendió descubrir que los grotescos son en realidad "normales". Leonardo se tomó las únicas libertades que sus reglas permitían: exagerar mandíbulas, narices, bocas y frentes. Como él mismo decía, la línea que va desde la ceja hasta la unión del labio con el mentón, al ángulo posterior de la mandíbula y a la raíz superior de la oreja forma un cuadrado perfecto cuyos lados miden media cabeza. Los grotescos parecen tan naturales porque tienen las proporciones "correctas"; Leonardo empleó una misma "armadura", como sugirió Kenneth Clark.

Interesado por las posibilidades analíticas del ordenador, Eugenio Battisti me propuso que estudiara el color de los frescos de otro artista italiano, Piero della Francesca. Su *Resurrección de Cristo*, en Sansepolcro, fue encalada y, aunque parte del recubrimiento se retiró





3. *LA RESURRECCION DE CRISTO*, fresco pintado por Piero della Francesca en el siglo quince, fue enlucido en algún momento del siglo diecisiete. Aunque desde entonces se ha retirado parte del recubrimiento, aún se le ve desvaído (*izquierda*).







después, persiste la duda de si la restauración fue completa. Antes de seguir adelante, los restauradores tenían que saber cuáles fueron los colores originales.

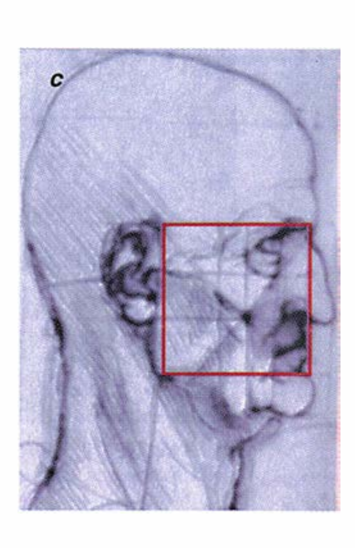
Para estudiar el fresco elegí un sistema de alto rendimiento que interpreta el matiz, el brillo y la saturación de un color, píxel a píxel. Al sustraer electrónicamente el blanco del encalado, hallé que *La Resurrección* se pintó en colores crepusculares. Battisti señalaba, además, que lo más probable es que Piero aprovechase el sol del atardecer, que entraría por una ventana abierta en lo alto de la pared occidental del edificio original, para acentuar ese colorido. La ampliación en pantalla descubrió además que a un lado había un espino simbólico y una curiosidad: que el Cristo tenía una oreja deforme.

También en Europa, otro misterio había permanecido larvado durante siglos. En 1990 emprendí la comparación de los retratos de Shakespeare y sus coetáneos con la esperanza de establecer la identidad del bardo. Poco después recibí una invitación para continuar este trabajo en Inglaterra. Algunos estudiosos consideran que el retrato más auténtico de Shakespeare es el que acompaña la edición de 1623 de sus obras, el *Primer Infolio*.

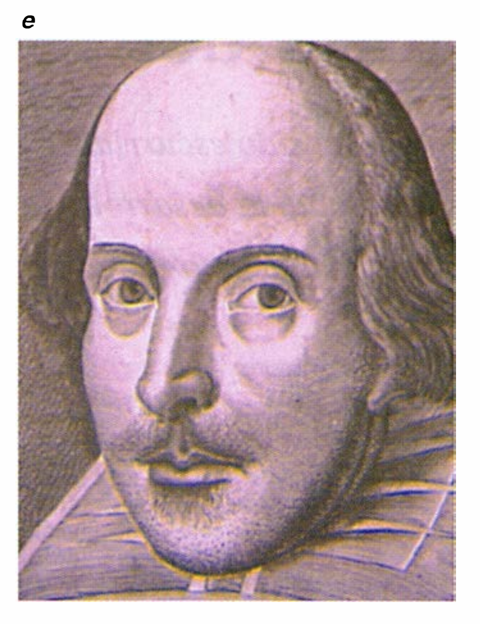
3. LOS GROTESCOS DE LEONARDO (se muestran dos, *a* y *b*), con todo lo estrafalarios que son, cumplen las mismas proporciones que el pintor estableció para pintar una cara normal (*c*). La ceja se alinea con la raíz superior de la oreja, ésta con el ángulo posterior de la mandíbula, éste con el borde inferior del labio y dicho borde con el ceño, formando así un cuadrado perfecto (*línea roja*). Para dibujar sus grotescos, Leonardo exageró la nariz, la boca o la mandíbula. Si se cambia la escala de los perfiles y uno de los rasgos se recorta a lo largo de las líneas prescritas, encajará perfectamente en cualquiera de las otras caras. Así, un grotesco toma un ojo de la cara normal (*d*) y una boca y una mandíbula normales (*e*). O un grotesco le presta su barbilla a otro (*f*). Estos pastiches también producen caras naturales.











4. EL RETRATO DE LA REINA ISABEL I de Inglaterra pintado por George Gower (*a*) poco se parece, a primera vista, al de Shakespeare (*e*) que grabó Martin Droeshout. Sin embargo, muchos rasgos de las dos caras coinciden. En estas imágenes se han superpuesto diversas secciones del retrato de Shakespeare sobre el de la reina. En (*b*), los contornos de la parte derecha del rostro se funden y las barbillas coinciden, pero el ancho del ojo está disminuido. Como puede apreciarse en (*c*), cuando se alinea un fragmento de la frente a la derecha, las líneas del cabello coinciden a la izquierda. Hay grabada una segunda línea (la denominada "línea misteriosa") que se dobla hacia arriba con respecto a la mandíbula de la reina. Como las dos líneas eran entonces visibles, Droeshout sombreó la mandíbula y el área adyacente; a continuación subió la línea del pelo y corrigió en consecuencia la frente de la reina. El efecto es la extraña frente bulbosa que aparece en el dibujo de Droeshout. En (*d*), la frente de la reina coincide con la de Shakespeare, como también lo hace la línea derecha de ambas mandíbulas; el ojo izquierdo cae en su sitio. Estos y otros detalles dan a entender que el rostro de Shakespeare se trazó a partir de un bosquejo del rostro de la reina.

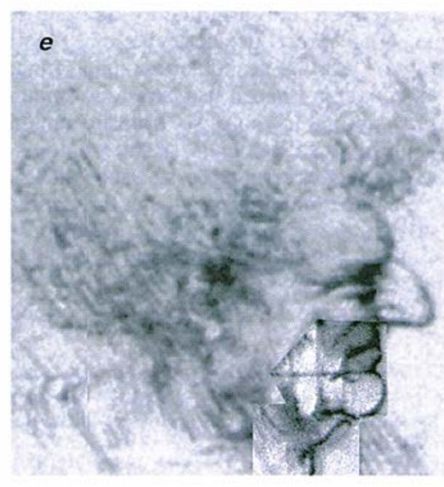
Siglo y medio después, Thomas Gainsborough impugnó el grabado, obra del joven artista Martin Droeshout, en estos términos: "Nunca he visto una cara más estúpida. Es imposible que semejante espíritu y talento brillasen con una cara como ésa." La verdad es que la frente bulbosa del retrato es anatómicamente absurda. La doble línea del maxilar inferior, arguyen otros, representa una máscara.

La comparación digital de los rasgos de ese dibujo con los del conde de Oxford y muchos otros notables me condujo a un callejón sin salida. Con la sensación de que había defraudado a mis anfitriones, volví, el último día de mi estancia, a la Galería Nacional de Retratos. Allí observé que desde un retrato de la reina Isabel I me contemplaban los mismísimos ojos que llevaba escrutando desde hacía semanas.

Una comparación detallada en el ordenador reveló que la mayoría de las líneas del grabado de Droeshout y del retrato de la reina pintado por George Gower eran iguales. Aunque los ojos, la nariz y la curvatura de los rostros encajaban perfectamente, en algunos rasgos hay un extraño desplazamiento. Tengo una teoría para explicar este parecido y el desplazamiento. Al tener que inventar una cara para Shakespeare, Droeshout debió de basar su grabado en un cartón del rostro de la reina. Los artistas suelen echar mano de procedimientos de ese estilo, y abundaban entonces los bosquejos autorizados de la reina, en los que habían de basarse todos sus retratos.

El grabado en metal es un proceso laborioso; puede que, terminado el lado izquierdo del rostro, Droeshout volviese al grabado pasado algún tiempo y, deliberada o involuntariamente, desplazase el cartón. El perfil de la derecha, aun siguiendo el contorno de la cara de Isabel I, se movió. La cabeza se volvió alargada y bulbosa, lo que hizo que la mandíbula pareciese demasiado ancha para una cara que ahora era más estrecha, error que Droeshout intentó corregir. De ahí la doble línea mandibular.

Aunque el rostro que aparece en las obras de Shakespeare se basara en el cartón de la reina, prosigue debatiéndose quién las escribió. El ordenador ayuda a resolver algunos enigmas, pero crea otros.





Breve historia del infinito

La noción de infinito siempre ha sido escurridiza. Puede incluso que la teoría matemática más aceptada, la desarrollada por Georg Cantor, no haya situado al infinito sobre fundamentos verdaderamente rigurosos

A. W. Moore

Al igual que casi todo el mundo, durante más de dos milenios los matemáticos no han sabido a ciencia cierta qué pensar del infinito. Varias paradojas ideadas por los pensadores griegos y medievales les habían convencido de que acerca del infinito no se podía reflexionar impunemente. Así estaban las cosas en los años setenta del siglo pasado cuando Georg Cantor desveló la matemática transfinita, rama de las matemáticas que aparentemente resolvía todas las paradojas que planteaba el infinito. Cantor, en su obra, demostraba que existían números infinitos, que los había de distinto tamaño y que podían utilizarse para medir la extensión de conjuntos infinitos. Pero, ¿llegó realmente a disipar todas las dudas suscitadas por el infinito? En la actualidad, casi todo el mundo opina que sí, pero yo me atrevo a señalar que podría, en verdad, haber reforzado tales dudas.

La hostilidad de los matemáticos hacia el infinito comenzó en el siglo V antes de Cristo, cuando Zenón de Elea, discípulo de Parménides, enunció la conocida paradoja de Aquiles y la tortuga [*véase* "Una resolución de las paradojas de Zenón", por William I. McLaughlin, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1995]. En esa aporía, el veloz semidiós desafía a una tortuga en una carrera, concediéndole cierta ventaja. Antes de poder adelantarla, Aquiles ha de alcanzar el punto del que la tortuga partió, pero en ese momento el quelonio habrá avanzado un poco. Aquiles ha de recorrer entonces la nueva distancia que los separa, pero cuando lo haya hecho la tortuga habrá avanzado un poquito más. Y así sucesivamente, *ad infinitum.* Parece que Aquiles no podrá adelantar nunca a la tortuga. De igual manera, Zenón argüía que nunca sería posible recorrer por completo una pista de carreras. Para hacerlo sería necesario alcanzar el punto medio, después el punto situado a tres cuartos, después el situado a siete octavos, y así sucesivamente. Zenón llegó a la conclusión de que no sólo el movimiento es imposible, sino que más valdría no pensar en lo infinito.

El matemático Eudoxo, igualmente desconfiado con respecto al infinito, ideó el llamado método de exhaustación (o exhaución) con el propósito de eludirlo en ciertos contextos geométricos. Unos cien años después, Arquímedes se valió de tal método para hallar el área exacta de un círculo. ¿Cómo procedió? En el recuadro a él dedicado en el artículo expongo, no la deducción que realmente hizo, sino una corrupción de la misma. El procedimiento de Arquímedes consistía, en parte, en considerar la fórmula del área de un polígono de n lados iguales —llamémoslo P_n— inscrito en un círculo C. De acuerdo con la distorsión de su razonamiento, esta fórmula es aplicable al propio círculo, que no es sino un polígono de infinitos lados infinitamente pequeños.

Esta perversión del argumento de Arquímedes no carece de cierto atractivo intuitivo, pero no le hubiera satisfecho. No podemos hacer uso acrítico del infinito, como si sólo se tratase de un entero insólitamente grande. Parte de lo que ocurre en este caso es que, cuanto mayor sea n, tanto mejor se ajustará P_n a C. Pero también es cierto que, cuanto mayor es n, mejor se aproxima P_n a un círculo con una protuberancia, al que llamaremos C^*. Intuitivamente, la cuestión clave es que C, a diferencia de su análogo deformado C^*, es el límite de los polígonos (o de aquello hacia lo que éstos tiendan).

Resulta, empero, muy difícil ver alguna forma de captar esta intuición sin considerar, una vez más, a C como un "infinígono". Arquímedes nos dio un procedimiento: señaló exactamente la diferencia crucial entre C y C^*, demostrando el siguiente enunciado: por pequeña que sea la superficie considerada, llamémosla ε, existe un entero n que es lo bastante grande como para que el área de P_n se diferencie en menos que ε del área de C. No ocurre lo mismo para C^*. Este hecho, combinado con un resultado similar para polígonos circunscritos y complementado con una versión refinada de la lógica contenida en dicho argumento, le permitió finalmente a Arquímedes demostrar, sin invocar jamás el infinito, que el área del círculo es igual a πr^2.

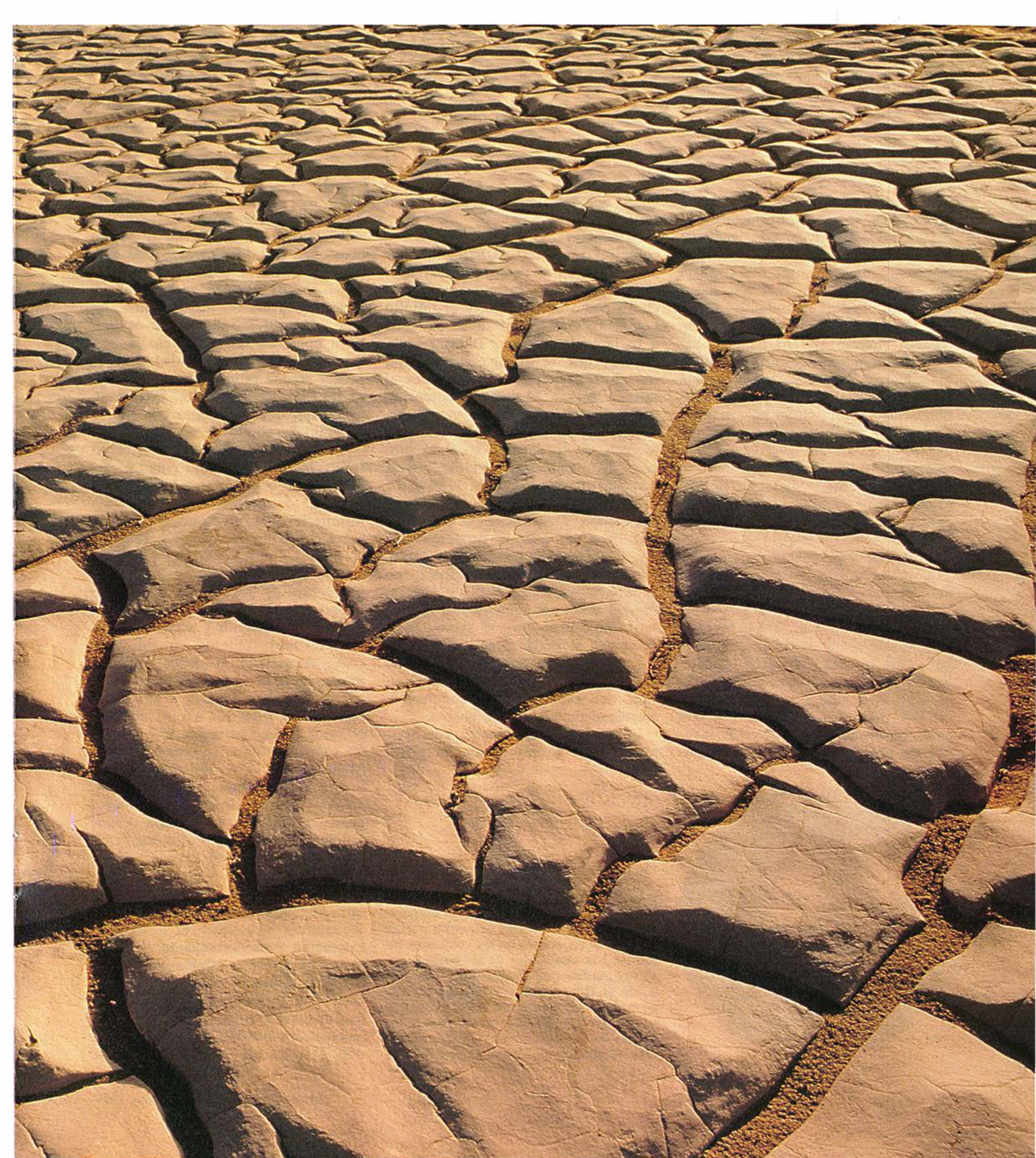
Aunque Arquímedes esquivó el infinito con éxito en este ejercicio concreto, los pitagóricos dieron con un caso en el que el infinito era auténticamente ineludible. Este hallazgo hizo que se desmoronase su convicción en dos principios cosmológicos fundamentales: Peras (el límite), que subsumía todo lo bueno, y Apeiron (lo ilimitado o infinito), que abarcaba cuanto era malo. Los pitagóricos habían insistido en que la creación podía entenderse mediante los números enteros positivos y que, en realidad, estaba en última instancia constituida por ellos, siempre finitos. Esta reducción era posible, sostenían, porque Peras subyugaba sin cesar a Apeiron.

Pitágoras había descubierto, sin embargo, que el cuadrado del lado

A.W. MOORE enseña filosofía en la Universidad de Oxford. Su interés académico se centra en la lógica, la metafísica y la filosofía de Immanuel Kant y Ludwig Wittgenstein, quienes han influido en su trabajo sobre el infinito.

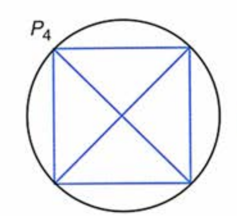
1. EXTENSION ILIMITADA, plasmada en el suelo recocido del Valle de la Muerte en California. Para asir la noción de infinito, los matemáticos han debido enfrentarse a diveras paradojas, acabando por concluir que hay infinitos de diferentes tipos, unos mayores que otros.

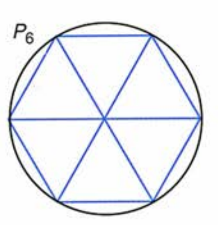
mayor de un triángulo rectángulo (hipotenusa) es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. De acuerdo con este teorema, la razón entre la diagonal de un cuadrado y cada lado es de $\sqrt{2}$ a 1, dado que $1^2 + 1^2 = (\sqrt{2})^2$. De ser Peras invulnerable, esta razón podría expresarse en forma de fracción p/q, siendo p y q sendos enteros positivos. Eso, sin embargo, es imposible. Imaginemos dos enteros positivos, p y q, tales que la razón de p a q (es decir, p dividido por q) sea equivalente a $\sqrt{2}$. Podemos dar por supuesto que p y q no tienen ningún divisor común mayor que 1 (de tenerlo, los dividiríamos por ese factor). Ahora bien, p^2 es el doble de q^2. Por tanto, p^2 es par, lo que implica que el propio p es par. En consecuencia, q ha de ser impar, pues si no, p y q tendrían el divisor común 2. Pero fijémonos: si p es par, tiene que haber un entero positivo r que sea exactamente la mitad de p. Así pues, $(2r)^2$ es igual a q^2, lo que entraña que q^2 es par, por

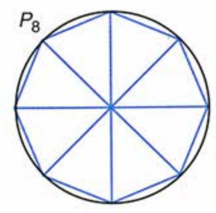


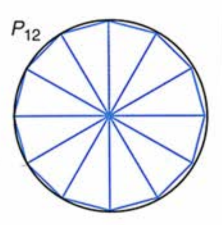
Arquímedes y el área del círculo

¿Cómo se valió Arquímedes de su método de exhaución para hallar el área de un círculo? He aquí la corrupción de su argumento. Imaginemos un círculo C de radio r. Para cada entero n mayor que 2 podemos construir un polígono regular de n lados e inscribirlo en C. Este polígono de n lados —llamémoslo Pn— puede dividirse en n triángulos congruentes. Sean b_n y h_n la base y la altura de cada triángulo, respectivamente. El área de cada triángulo es $1/2\ b_n h_n$. Por consiguiente, el área de P_n como un todo es $n(1/2\ b_n h_n)$, o sea $1/2\ nb_n h_n$. Pero el propio círculo C es un polígono de infinitos lados infinitamente pequeños. Esto es, C se obtiene al extender la definición original de Pn y permitir que n sea infinito. En este caso nb_n es la circunferencia de C, que es igual a $2\pi r$ (como se deduce de la definición de π) y h_n es el radio r. Por tanto, el área de C es $1/2(2\pi rr)$, o sencillamente, πr^2.









lo que el propio q es par, en contra de lo demostrado anteriormente.

Para los pitagóricos, este resultado fue una verdadera catástrofe. (Según la leyenda, uno de ellos fue arrojado por la borda en alta mar tras haber revelado el descubrimiento a sus enemigos.) Habían topado con un número "irracional". Al hacerlo, habían comprendido las limitaciones de los enteros positivos, y se habían visto obligados a reconocer la presencia del infinito en su mismo seno. De hecho, un matemático moderno diría que $\sqrt{2}$ es una especie de "objeto infinito". No sólo es infinito su desarrollo decimal, sino que tal desarrollo jamás adopta una pauta repetitiva periódica.

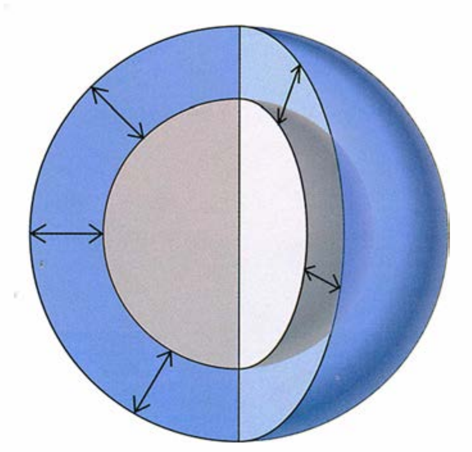
Aristóteles, en el siglo IV antes de Cristo, reconoció que el problema era más general. Por una parte hay razones de peso para aceptar la existencia del infinito. Dejando a un lado la raíz cuadrada de dos, el tiempo puede proseguir indefinidamente, los números, sucederse sin fin, y el espacio, el tiempo y la materia parecen ser divisibles sin cesar. Por otra parte, no obstante, hay diversas razones de peso —entre ellas, las paradojas de Zenón— para rechazar el infinito.

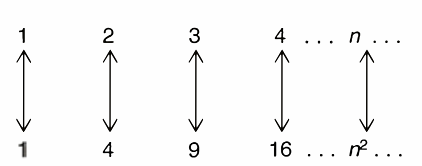
Aristóteles dio a este dilema una solución magistral. Distinguió dos clases diferentes de infinito: el infinito actual, cuya infinitud existe en cierto punto del tiempo, y el infinito potencial, cuya infinitud se extiende a lo largo de tiempo. Todas las objeciones que se opongan al infinito, repetía Aristóteles, son objeciones al infinito actual. El infinito potencial, por otra parte, constituye una característica fundamental de la realidad. Merece ser reconocido en todo proceso que pueda no terminar nunca, como la acción de contar, la división de la materia o el propio transcurrir del tiempo. Esta distinción entre ambos tipos de infinito proporcionaba una solución a las paradojas de Zenón. Atravesar una región del espacio no entraña moverse a través de una infinidad actual de subregiones, lo cual sería imposible. Pero sí supone atravesar una infinidad potencial de subregiones, en el sentido de que no puede haber fin al proceso de división del espacio. Esta conclusión, afortunadamente, es inofensiva.

La distinción establecida por Aristóteles entre infinito potencial y real constituyó durante mucho tiempo la ortodoxia. Sin embargo, los eruditos solían interpretar su alusión al tiempo como una metáfora de algo más profundo y abstracto. Existir "en el tiempo" o existir "de una vez" entrañaba significados mucho más amplios. Situar aparte al infinito actual equivalía a poner en tela de juicio la idea misma de que una entidad pudiera poseer alguna propiedad que excediese de toda medida finita. Era negar, asimismo, que el infinito constituyese legítimo objeto de estudio.

Unos dos mil años después, el infinito, tanto el potencial como el actual, volvió a inquietar a los matemáticos, al desarrollar éstos el cálculo infinitesimal. Los primeros trabajos sobre el cálculo, inaugurados por Isaac Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz a finales del siglo XVIII, estaban muy por debajo de las normas de rigor de los griegos. De hecho, los matemáticos hicieron uso amplio y acrítico de los infinitésimos, objetos considerados como demasiado pequeños para ser mensurables. A veces, tales cantidades se consideraban iguales a cero; por ejemplo, al sumarlos a otro número, el valor de éste permanecía el mismo. En otras ocasiones, se tenían por distintos de cero y se utilizaban en las divisiones. Guillaume François Antoine de l'Hôpital escribió: "Una curva puede considerarse la totalidad de una infinitud de segmentos rectilíneos, cada uno infinitamente pequeño; o (...) un polígono de infinito número de lados". Hubo que esperar al siglo XIX para que Augustin Louis Cauchy y Karl Weierstrass resucitasen el método de exhaución y proporcionaran al cálculo un fundamento estable.

Como resultado de los trabajos de Cauchy y Weierstrass, la mayoría de los matemáticos se sintieron menos amenazados por las paradojas de Zenón. Más les preocupaba una familia





2. DOS CONJUNTOS son del mismo tamaño si todos sus elementos pueden emparejarse entre sí. Pero este principio parece infringirse en el caso de los conjuntos infinitos. Los cuadrados de los enteros positivos pueden coordinarse biunívocamente con los enteros positivos (*arriba*), a pesar de que el conjunto de los cuadrados parece menor. Análogamente, todos los puntos de la esfera menor pueden emparejarse con los de la mayor (*izquierda*).

de paradojas nacidas en la Edad Media que trataban de la equinumerosidad. Estas paradojas arrancan del principio según el cual, si es posible emparejar todos los miembros de un conjunto con todos los pertenecientes a otro, ambos conjuntos han de tener igual número de elementos. Por ejemplo, en una sociedad monógama debe darse exactamente el mismo número de maridos que de esposas. Este principio parece irrefutable. Sin embargo, al aplicarlo a conjuntos infinitos parece infringir una noción fundamental enunciada ya por Euclides, a saber, que el todo es siempre mayor que cualquiera de sus partes. Es posible coordinar, por ejemplo, la totalidad de los enteros positivos con los pares: 1 con 2, 2 con 4, 3 con 6, y así sucesivamente —a pesar de que los enteros positivos contienen, además, a los números impares.

Los medievales idearon muchos otros ejemplos parecidos, algunos de ellos geométricos. En el siglo XIII, el matemático escocés John Duns Scoto reflexionaba sobre el caso de dos circunferencias concéntricas: todos los puntos de la circunferencia del círculo menor, que es más corta, pueden emparejarse uno a uno con los puntos de la circunferencia del mayor, que es más larga. Otro tanto vale para dos esferas. Galileo, unos 350 años más tarde, examinaba una variante del ejemplo del emparejamiento de los números enteros pares, basada esta vez en los cuadrados de los números. Resulta particularmente llamativo que, al considerar segmentos cada vez mayores en la sucesión de números enteros, la proporción de cuadrados contenidos en ellos tienda a cero. El emparejamiento, no obstante, prosigue indefinidamente.

En vista de estas dificultades, resulta sin duda tentador evitar deliberadamente a los conjuntos infinitos. Con mayor generalidad, resulta tentador negar, como hizo Aristóteles, la posibilidad de reunir, en un solo acto y de una vez, una infinidad de cosas. Cantor, empero, acabó desafiando la concepción aristotélica. En un brillante trabajo examinó las paradojas tranquila y concienzudamente y formuló una teoría precisa, coherente y sistemática del infinito actual, capaz de soportar cualquier escrutinio escéptico. Cantor aceptó el principio de coordinación o emparejamiento y su recíproco, a saber, que dos conjuntos no pueden ser equinumerosos sin que sus elementos puedan coordinarse. Por consiguiente, aceptó que existen tantos enteros positivos pares cuantos enteros positivos en total (y análogamente en los demás casos paradójicos).

SUBCONJUNTOS	ENTEROS POSITIVOS 1	2	3	4	5 . . .
ENTEROS PARES	NO	SI	NO	SI	NO
ENTEROS IMPARES	SI	NO	SI	NO	SI
NUMEROS PRIMOS	NO	SI	SI	NO	SI
CUADRADOS	SI	NO	NO	SI	NO
MULTIPLOS DE 4	NO	NO	NO	SI	NO . . .
⋮					
CONJUNTO DIAGONALIZADO	SI	SI	NO	NO	SI . . .

3. EL TEOREMA DE CANTOR —a saber, que ningún conjunto tiene tantos elementos como subconjuntos— se demuestra por diagonalización, proceso que crea un subconjunto nuevo. Cada subconjunto del conjunto de los enteros positivos está representado por una serie de síes y noes. Un sí indica que el entero pertenece al subconjunto; un no, que no pertenece. Al reemplazar cada sí por un no, y viceversa, a lo largo de la diagonal (*región sombreada*) se crea un subconjunto nuevo.

¿Qué se deduce de ello? Si este principio significa que el todo no es mayor que las partes, así sea. De hecho, podemos valernos de este argumento para definir el infinito, al menos, en lo que a conjuntos se refiere: un conjunto es infinito si no es mayor que alguna de sus partes. Con mayor precisión, un conjunto es infinito si tiene tantos elementos como alguno de sus subconjuntos (subconjuntos en sentido estricto, llamados subconjuntos propios).

Una vez aclaradas así las cosas, sigue pendiente la cuestión de si todos los conjuntos infinitos son equinumerosos. Gran parte del impacto del trabajo de Cantor se debió a su demostración de que no lo son. Hay infinitos de diferentes tamaños. Esta proposición se deduce del teorema de Cantor: ningún conjunto, y en particular, ningún conjunto infinito, tiene tantos elementos como subconjuntos. Dicho de otro modo, ningún conjunto es tan grande como el conjunto de sus subconjuntos. ¿Por qué no? Porque si un conjunto lo fuera, sería posible coordinar uno a uno todos sus elementos con todos sus subconjuntos. Algunos elementos podrían pertenecer al subconjunto con el que están emparejados; otros, no. ¿Y qué ocurre entonces con el conjunto de aquellos elementos que no pertenecen al conjunto con el que están emparejados? Dicho conjunto no puede ser emparejado con un elemento sin incurrir en una contradicción.

El razonamiento puede exponerse también en forma de diagrama. Tomaré, por comodidad, el conjunto de los enteros positivos. Cualquier subconjunto del conjunto de los enteros positivos puede representarse mediante una sucesión de síes y noes, que registra cuáles de los sucesivos enteros pertenecen al conjunto y cuáles no. Por ejemplo, el conjunto de los enteros pares puede representarse por la sucesión, no, sí, no, sí, no, ... correspondiente a 1, 2, 3, 4, 5, etc. Se puede hacer lo mismo para la sucesión de enteros impares sí, no, sí, no, sí, ..., para el conjunto de los números primos, no, sí, sí, no, sí... y para el conjunto de los cuadrados sí, no, no, sí, no, ... Entonces, de forma general, cualquier asignación de distintos conjuntos a enteros positivos individuales (como en el ejemplo ilustrado, puramente arbitrario) podría quedar representada mediante un cuadro infinito de síes y noes.

Para demostrar que hay al menos un subconjunto que no aparece en esta lista, construimos un nuevo conjunto bajando por la "diagonal del cuadro" y sustituyendo cada "sí" por un "no" y viceversa. En el caso ilustrado, escribimos sí, sí, no, no.... El resultado representa al subconjunto en cuestión. Pues, por construcción, difiere del primer subconjunto de la lista en si 1 pertenece o no a él, del segundo en cuanto a la pertenencia del 2, del tercero en cuanto a la pertenencia del 3, y así sucesivamente. Se produce aquí una grata coincidencia histórica: igual que el estudio de la diagonal de un cuadrado llevó a los pitagóricos a admitir la existencia de una infinitud inalcanzable mediante los enteros positivos, igual ocurrió, aunque de forma diferente, en el caso de Cantor.

Posteriormente, Cantor ideó los cardinales transfinitos, utilizables para medir el tamaño de los conjun-

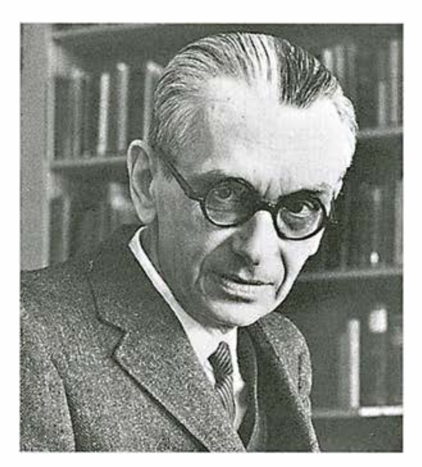
El método de la diagonal y el teorema de Gödel

La diagonalización utilizada para establecer el teorema de Cantor se sitúa también en el centro del célebre teorema expuesto en 1931 por el matemático austríaco Kurt Gödel. Su explicación ofrece una diáfana visión del resultado obtenido por Gödel.

El teorema de Gödel trata de sistemas formales de aritmética, entendiendo por aritmética la teoría de los enteros positivos y las operaciones básicas aplicadas a ellos, como la adición y la multiplicación. El teorema afirma que ningún sistema de leyes (axiomas y reglas) puede tener potencia suficiente para demostrar todos los enunciados verdaderos de la aritmética, sin ser al mismo tiempo tan fuerte que "demuestre" también enunciados falsos. De modo equivalente, no existe un único algoritmo para distinguir todos los enunciados aritméticos verdaderos de los falsos. Para demostrar el teorema de Gödel hacen falta dos definiciones y dos lemas, o sea, dos proposiciones. No es posible demostrar los lemas en este ámbito, aunque ambos son francamente plausibles.

Definición 1: Un conjunto de enteros positivos es aritméticamente definible si es posible definirlo con terminología aritmética estándar. Por ejemplo, el conjunto de los números cuadrados, el de los números primos y el de los enteros positivos menores que —pongamos por caso— 821.

Definición 2: Un conjunto de enteros positivos es decidible si existe un algoritmo para determinar si un entero positivo cualquiera pertenece al conjunto. Los tres conjuntos citados sirven de ejemplo.



Kurt Gödel, 1906-78

Lema 1: Existe un procedimiento algorítmico para emparejar enteros positivos y conjuntos aritméticamente definibles.

Lema 2: Todo conjunto decidible es aritméticamente definible.

Dado el lema 1, el procedimiento diagonal produce un conjunto de enteros positivos que no es aritméticamente definible. Llamemos *D* a este conjunto. Supongamos ahora que, contrariamente a la tesis del teorema de Gödel, existe un algoritmo para distinguir entre enunciados aritméticos verdaderos y falsos. Entonces *D*, en virtud de su construcción, es decidible. Pero según el lema 2, esta proposición contradice el que *D* no sea aritméticamente definible. Así pues, el teorema de Gödel tiene que ser verdadero, después de todo. Q. E. D.

tos infinitos. Inventó, asimismo, una especie de aritmética para ellos. Habiendo definido sus términos, exploró la suma de cardinales infinitos, su multiplicación, su potenciación y así sucesivamente. En su trabajo hizo gala de una maestría matemática de primera categoría. Pero incluso en sus propios términos persistían las dificultades. Tal vez la más conocida de ellas sea la hipótesis del continuo. El conjunto de los enteros positivos es, como hemos visto, menor que el conjunto de los conjuntos de enteros positivos. Pero, ¿cuánto menor? Y más concretamente, ¿existen conjuntos de tamaño intermedio?

La hipótesis propia de Cantor, su famosa "hipótesis del continuo", era que no existen. Ahora bien, jamás logró demostrar con éxito esta idea, ni tampoco refutarla. Trabajos posteriores han demostrado que la situación es mucho más seria de lo que él había imaginado. Con todos los métodos aceptados por las matemáticas modernas, la cuestión resulta imposible de zanjar, y suscita problemas filosóficos acerca del determinismo de la concepción cantoriana. Preguntarse por la verdad de la hipótesis del continuo puede ser como preguntarnos si Hamlet era zurdo. Es posible que nuestros conocimientos sean insuficientes para ofrecer una respuesta. En tal caso, deberíamos reconsiderar hasta qué punto el trabajo de Cantor ha conseguido domesticar el infinito actual.

Mayor relevancia aún revisten las cuestiones relativas al conjunto de todos los conjuntos. De acuerdo con el teorema de Cantor, esta colección ha de ser estrictamente menor que el conjunto de conjuntos de conjuntos. Pero... ¡un momento! Los conjuntos de conjuntos son también conjuntos, de donde se deduce que el conjunto de los conjuntos tiene que ser menor que uno de sus propios subconjuntos en sentido estricto. Eso, sin embargo, es imposible. El todo puede ser de igual tamaño que la parte, pero nunca menor. ¿Cómo consiguió Cantor zafarse de esta trampa? Con maravillosa pertinacia, negó la existencia de tal conjunto de conjuntos. Sus razones residen en la siguiente imagen de los conjuntos. Existen cosas que no son conjuntos; tenemos después conjuntos de todas esas cosas; están después los conjuntos de estos conjuntos, y así sucesivamente, sin fin. Cada conjunto pertenece a un conjunto ulterior, pero no se llega nunca a un conjunto al que pertenezca todo conjunto.

El razonamiento de Cantor puede parecer un tanto oportunista. Pero resulta imprescindible un argumento de este tipo, como reveló la memorable paradoja de Bertrand Russell, descubierta en 1901. Esta paradoja se refiere al conjunto de todos los conjuntos que no pertenecen a sí mismos. Llamemos *R* a este conjunto. El conjunto de los ratones, por ejemplo, es un miembro de *R*; no pertenece a sí mismo, porque es un conjunto, no un ratón. La paradoja de Russell se plantea al preguntarse si *R* puede pertenecer a sí mismo. De pertenecer, por definición no pertenece a *R*. Y si no pertenece, cumple la condición de pertenencia a *R* y, por tanto, es miembro de él. Sea cual sea el punto de vista que se adopte sobre los conjuntos, hay en *R* algo que no está claro. En la concepción de Cantor, según la cual ningún conjunto pertenece a sí mismo, *R*, si existiera, sería el conjunto de todos los conjuntos. Este argumento encaja en el cuadro pintado por Cantor, y el rechazo de *R* que entraña parece más razonable.

Pero, ¿no es este cuadro llamativamente aristotélico? Fijémonos en la metáfora temporal. En la imagen que se da de los conjuntos, éstos adquieren existencia "después" de sus elementos —de forma que siempre hay más por llegar. Su infinitud colectiva, contrariamente a la infinitud de cualquiera de ellos, es potencial, no real. Además, ¿no es esta infinitud colectiva la que más derecho tiene a tal título? En su acepción común se llama infinito lo que no tiene fin, lo que es ilimitado, inexplorable e inmensurable. Pocas personas admitirían que la definición técnica de conjunto infinito expresa la comprensión intuitiva que tienen de tal concepto. Pero dada la imagen de Cantor, las nocio-

nes de interminabilidad, ilimitación o inmensurabilidad se aplican con mayor propiedad a la jerarquía entera que a cualquiera de los conjuntos particulares que hay en ella.

En ciertos aspectos, pues, Cantor demostró que el conjunto de los enteros positivos, por ejemplo, "realmente" es finito y que lo que es "realmente" infinito es algo que está mucho más allá. (Cantor no era reacio a expresarse en esos términos.) Irónicamente, su trabajo parece haber aportado considerable solidez a la ortodoxia aristotélica de que la infinitud "real" nunca puede ser actual.

Algunos estudiosos han puesto objeciones a mi propuesta de que, según la concepción de Cantor, el conjunto de los enteros positivos es "realmente" finito. Dicen que esta afirmación discrepa no sólo de la terminología matemática estándar, sino también, contra lo que creo estar apuntando, de lo que diría casi todo el mundo.

Cierto es que casi todo el mundo diría que el conjunto de los enteros positivos es "realmente" infinito. Pero no es menos cierto que casi todo el mundo desconoce los resultados de Cantor. Negarían igualmente que un conjunto infinito pueda ser mayor que otro. Mi tesis no se refiere a lo que diría casi todo el mundo, sino a cómo entienden sus términos y cómo esa comprensión es más capaz, para cualquier propósito dado, de absorber el impacto de los resultados de Cantor. Aquí nada nos viene impuesto. Podríamos afirmar que algunos conjuntos infinitos son mayores que otros; y que el conjunto de los enteros positivos es finito; incluso podríamos negar la existencia de los enteros positivos.

Si la tarea que nos espera fuera la articulación de ciertos resultados matemáticos ya establecidos, yo abogaría por utilizar sólo la terminología matemática estándar. Pero insto a los matemáticos y demás científicos a que sean más precavidos de lo habitual al valorar cómo afectan los resultados de Cantor a las concepciones tradicionales del infinito. Lo verdaderamente infinito sigue estando mucho más allá de nuestro alcance.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TO INFINITY AND BEYOND: A CULTURAL HISTORY OF THE INFINITE. Eli Maor. Birkhauser, 1986.

THE INFINITE. A. W. Moore. Routledge, 1990.

INFINITY. Compilación de A. W. Moore. Dartmouth, 1993.

UNDERSTANDING THE INFINITE. Shaughan Lavine. Harvard University Press, 1994.

Reparto del poder en una ciudad mesopotámica

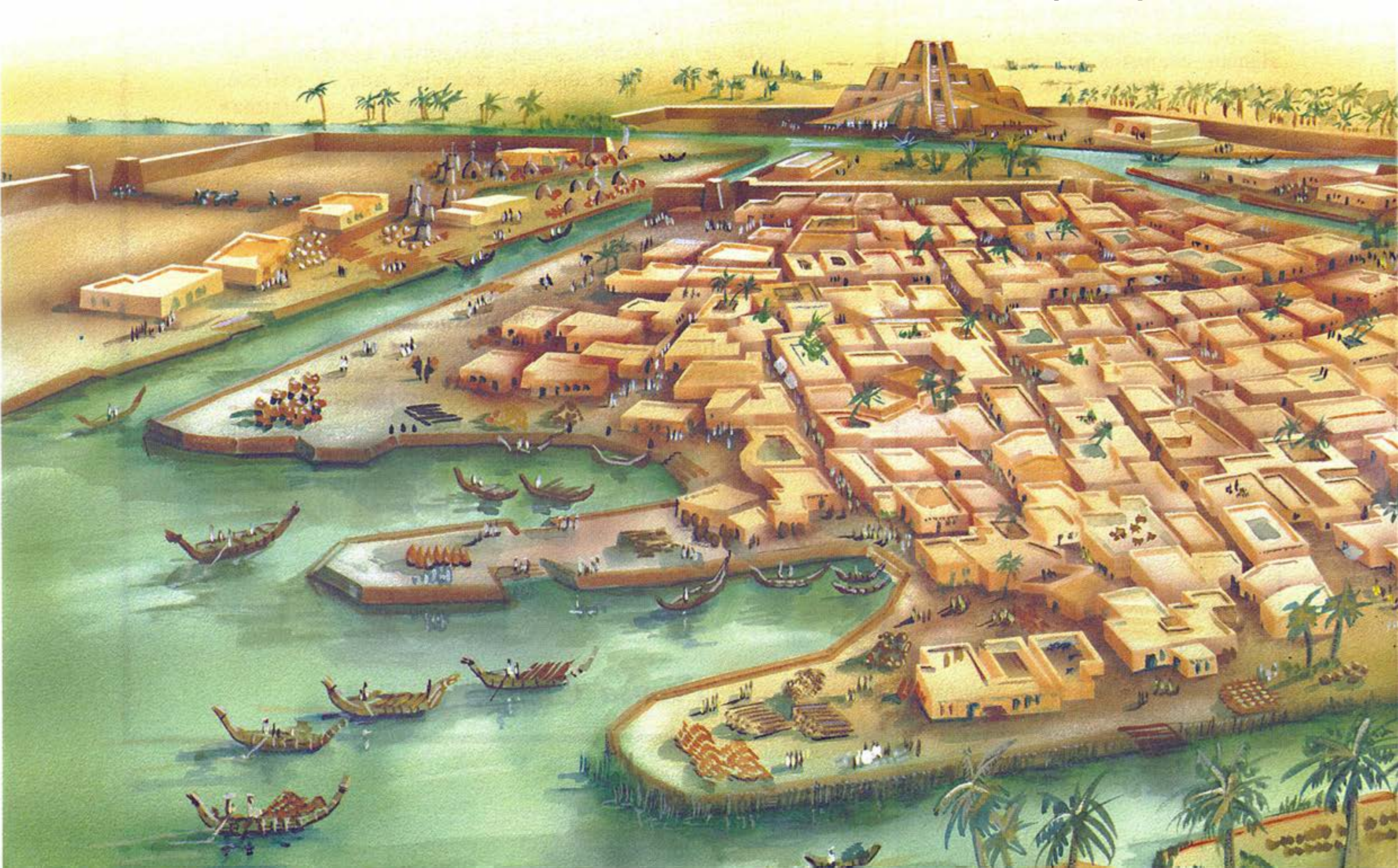
Mashkan-shapir fue por breve tiempo una de las ciudades más importantes del mundo. Sus restos arqueológicos cuestionan las ideas tradicionales en cuanto a la distribución del poder en las primeras sociedades urbanas

Elizabeth C. Stone y Paul Zimansky

Los restos de las ciudades más antiguas del mundo sobresalen en el paisaje del sureste de Irak. Durante casi dos siglos de excavaciones, los arqueólogos se han planteado infinidad de preguntas sobre el significado de los objetos hallados. De estas ciudades, construidas a lo largo de cinco milenios y medio de ocupación intermitente, quedan hoy los *tells*, montículos de ruinas y objetos asociados, que pueden tener más de un kilómetro de diámetro y superan en ocasiones los 30 metros de altura. Babilonia, Ur, Uruk, Nippur y Kish han proporcionado abundantes datos sobre la cultura material de la sociedad mesopotámica. Gracias a la extraordinaria resistencia de las tablas de arcilla que empleaban para escribir, nos han llegado también detallados testimonios textuales sobre sus instituciones políticas, intelectuales, religiosas y sociales.

Sin embargo, es aún poco conocida la organización física y social de aquellas antiquísimas ciudades. Por varias razones. Aunque resulte paradójico, la misma exuberancia de datos nos ha sumido en la ignorancia. Los *tells* son tan enormes, que ni los equipos mejor financiados pueden excavar más que pequeñas fracciones de cada ciudad. Y, peor aún, las trazas de los edificios que desentierran los arqueólogos no representan, generalmente, una ciudad que existiera de hecho en un tiempo determinado. Unas veces se edificaba sobre estructuras preexistentes; otras se derribaban o las transformaban en las nuevas. Parecido problema se les plantearía —imaginémoslo— a unos arqueólogos que, dentro de unos cuantos miles de años, trataran de hacerse una idea de Londres: se encontrarían con una mezcolanza de restos de rascacielos modernos, edificios victorianos, castillos normandos y hasta un castro romano; les sería, pues, casi imposible reconstruir el aspecto que tuvo la ciudad durante un período determinado.

La sociología urbana sabe, desde hace mucho, que los planos de las



ciudades de nuestro tiempo reflejan su pauta de organización social. De nuestra propia investigación sobre ciudades antiguas no mesopotámicas se infiere que podemos extraer también conclusiones similares a propósito de los asentamientos urbanos de la antigüedad. Donde el poder está concentrado y se basa en la coerción, los órganos administrativos, religiosos, fabriles y comerciales se apiñan, rodeados por las residencias de la clase dominante. Tal concentración no se observa, en cambio, en las sociedades caracterizadas por una división del poder entre diversos grupos y en las que las decisiones se toman en distintos niveles de la jerarquía social. Los lazos que vinculan, en estas ciudades descentralizadas, a las clases dominantes con el resto de la población se reflejan en la combinación de mansiones ricas y pobres en cada sector de residencia.

¿Dónde se sitúan, dentro de esa gama, las ciudades más antiguas? Hasta ahora, los arqueólogos se han mostrado proclives a resaltar el carácter centralista. Sin embargo, un examen atento de sus argumentos, unido a nuestros recientes hallazgos en Mashkan-shapir, obliga a revisar ese enfoque. Las excavaciones llevadas a cabo anteriormente en Mesopotamia tuvieron por objeto preferente las sedes de la riqueza y del poder: palacios y templos. Ello sesgó la reconstrucción de la sociedad que levantó tales edificios; al ceñirse a los restos materiales de valor superior, se soslayó que los textos mesopotámicos no refieren la existencia de distintas clases sociales; al contrario, atestiguan la importancia de las asambleas generales en la toma de decisiones.

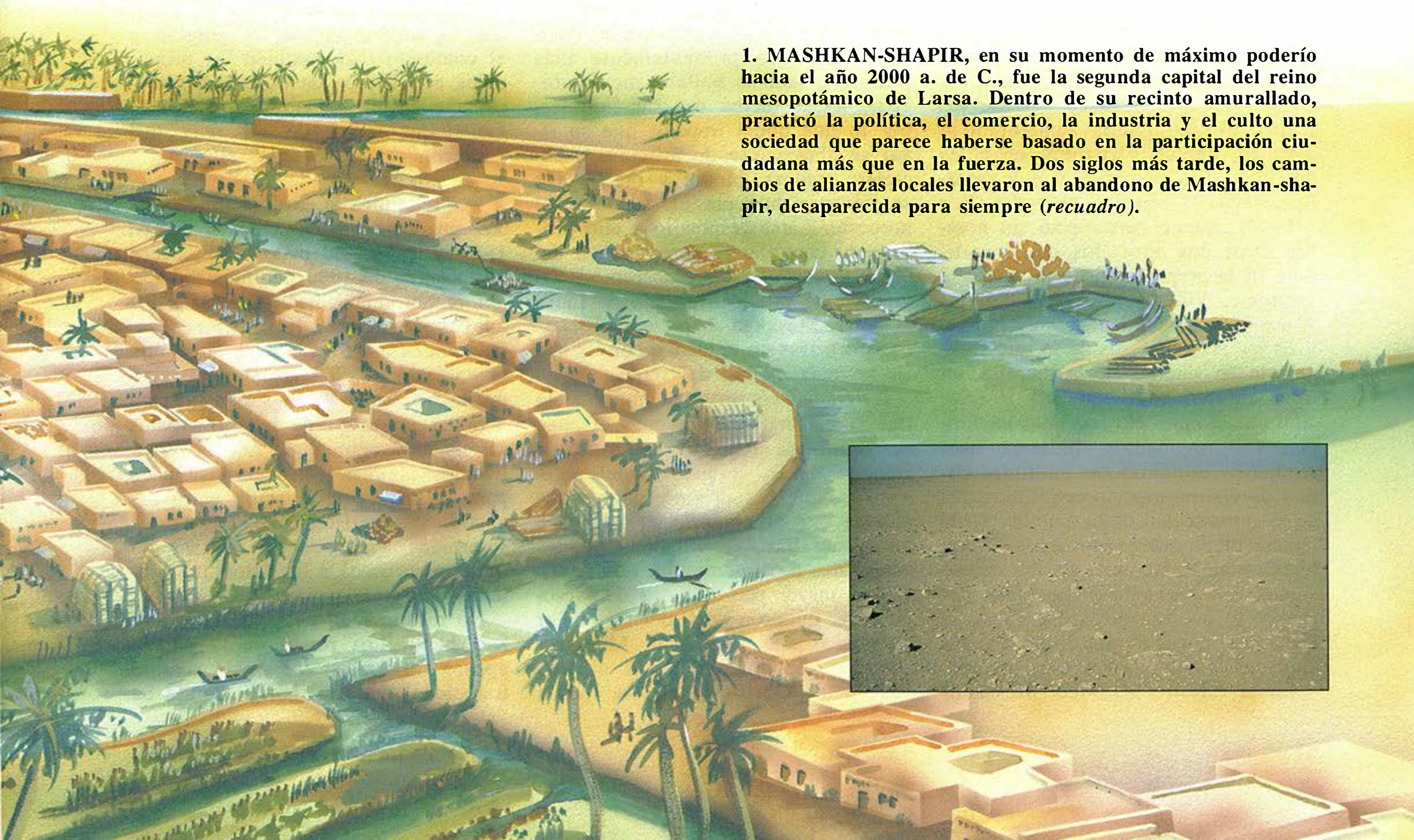
Quizás entre también en juego un prejuicio más sutil. Los historiadores reconocen que la industrialización y el capitalismo han transformado el mundo en tal medida, que no cabe comparar las ciudades modernas con las antiguas. Sin embargo, algunos, más que considerar el abanico de posibles organizaciones urbanas, han propuesto, tal vez con excesiva precipitación, un modelo unificado de "ciudad preindustrial" a partir de unos pocos ejemplos muy estudiados (y centralizados). Al idear este modelo rara vez se han remontado más allá de la Grecia clásica y, con frecuencia, ni siquiera más allá de la Europa medieval.

En consecuencia, se ha dado por sentado que, en la configuración de las ciudades mesopotámicas, intervinieron las mismas fuerzas que actuarían posteriormente en Europa; entre ellas, una base agrícola estable y un valor fijo para cada extensión de terreno. En Mesopotamia, no obstante, la base económica era cualquier cosa menos geográficamente estable, como indica la importancia del pastoreo nómada. Ni siquiera el suelo cultivado era estable: las inundaciones anuales, la intensa evaporación, así como la rápida y perniciosa salinización de la tierra, generaban un mosaico, en continuo cambio, de campos y vegas fértiles, desiertos y marismas, donde el poder o la riqueza poco tenían que ver con la posesión permanente de determinadas tierras. Las descripciones pormenorizadas de muchas civilizaciones urbanas preindustriales —del Africa occidental, del Oriente Medio islámico y del Nuevo Mundo en la época de la Conquista— nos hablan de una notable diversidad organizativa, y sugieren también una interconexión entre la estabilidad del suelo cultivable y el grado de centralización social y política.

ELIZABETH C. STONE y PAUL ZIMANSKY vienen colaborando desde hace más de 20 años en el estudio de las ciudades del Oriente Medio. Stone enseña antropología en la Universidad de Nueva York; Zimansky da clases de arqueología en la de Boston.

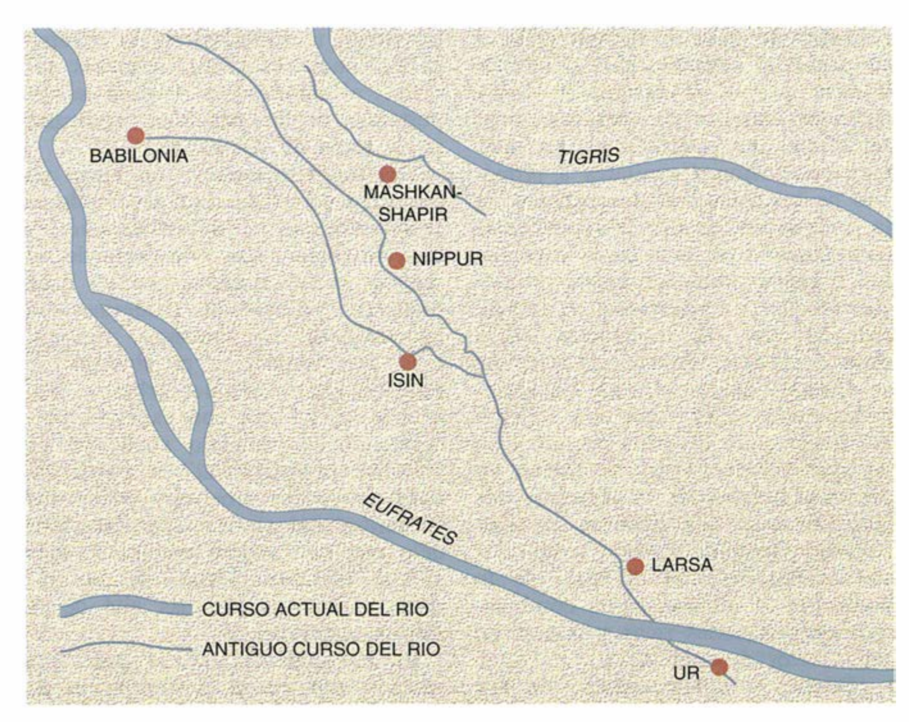
El proyecto arqueológico que llevó al descubrimiento de Mashkan-shapir se fraguó cuando decidimos abordar el tema de la organización urbana estudiando un paraje que hubiese estado habitado durante un solo período. Las ruinas de una ciudad de tan breve existencia habrían de proporcionar, sin duda, una instantánea del trazado urbanístico; el análisis de esa disposición física nos permitiría sacar algunas conclusiones sobre la forma en que emergió, si por imperio de sacerdotes y reyes o por acuerdo entre sectores sociales diversos.

Repasamos los datos reunidos por



1. MASHKAN-SHAPIR, en su momento de máximo poderío hacia el año 2000 a. de C., fue la segunda capital del reino mesopotámico de Larsa. Dentro de su recinto amurallado, practicó la política, el comercio, la industria y el culto una sociedad que parece haberse basado en la participación ciudadana más que en la fuerza. Dos siglos más tarde, los cambios de alianzas locales llevaron al abandono de Mashkan-shapir, desaparecida para siempre (*recuadro*).





2. LA ANTIGUA MESOPOTAMIA se extendía entre los ríos Tigris y Eufrates, en el actual Irak. La importancia estratégica de Mashkan-shapir se debió a su privilegiada situación junto al Tigris (*mapa del centro*), pues controlaba el tráfico de muchas mercaderías transportadas desde el norte por vía fluvial. En la fotografía tomada desde un satélite artificial (*derecha*), se aprecia la situación de la ciudad (*en verde*), con los canales y el cauce del Tigris, en su época de esplendor.

otros arqueólogos sobre la distribución de los asentamientos antiguos en Irak y elegimos uno que Robert Adams había descubierto a mediados de los años setenta. Este yacimiento, al que Adams había otorgado un número, carecía aún de nombre.

Visitamos por primera vez el lugar en enero de 1987. El paraje mostraba abundantes signos de ocupación. Mirando en derredor se distinguían restos de muros, de cerámica, de tumbas e incluso de antiguos canales, en un área de casi un kilómetro de diámetro. La mayoría de los fragmentos de cerámica databan del primer cuarto del segundo milenio a. de C. La cantidad y la calidad de los restos arqueológicos evidenciaban que los únicos visitantes recientes del lugar, los beduinos y sus camellos, apenas lo habían alterado.

El yacimiento permaneció sin nombre otros dos años, los que invertimos en la preparación de la campaña siguiente. Vueltos allí, en 1989, tuvimos la suerte de hallar, muy pronto, y en las proximidades de lo que fuera una de las puertas de la muralla, un trozo de terracota con una inscripción cuneiforme. No tardamos en limpiar 150 fragmentos similares, que, reunidos, resultaron ser múltiples copias de una inscripción conmemorativa de la construcción de la muralla. En la tercera pieza que examinamos podían leerse claramente tres de los cuatro signos con que se escribe Mashkan-shapir: el nombre de la que fuera, si bien por poco tiempo, una de las ciudades más importantes del mundo.

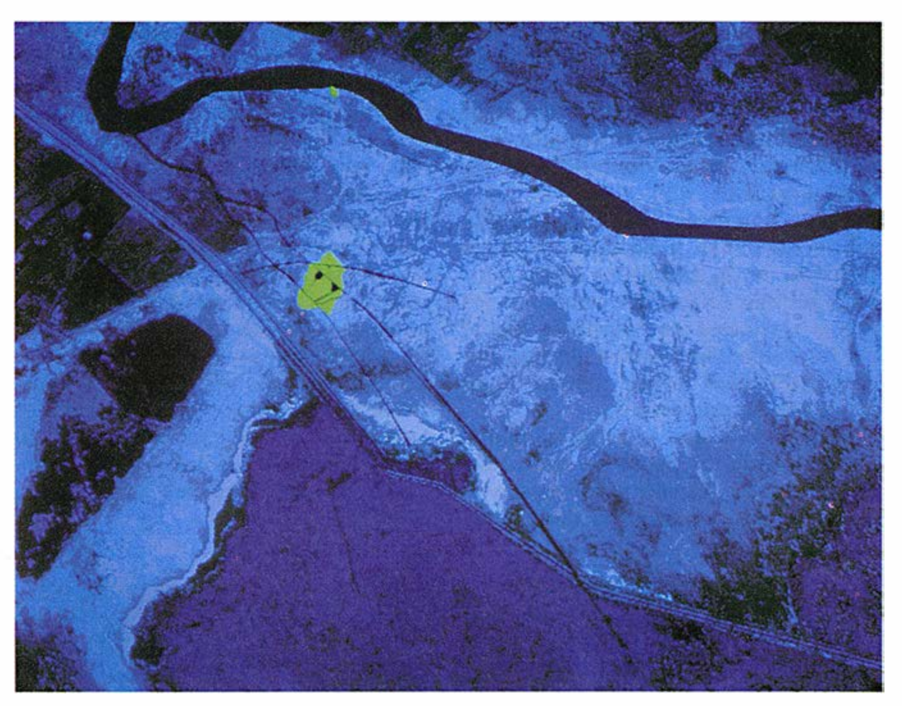
En el registro histórico, Mashkan-shapir aparece por primera vez a finales del tercer milenio a. de C. como una aldea dedicada a la cabaña de ovejas situada en un extremo de la región mesopotámica. Probablemente nunca habría alcanzado notoriedad de no haber sido por las complejas vicisitudes políticas de comienzos del segundo milenio. Poco antes del año 2000 a. de C., se hundió el imperio que tenía su capital en Ur y había controlado las llanuras de aluvión. Durante los dos siglos siguientes se disputaron la hegemonía varias ciudades, sobre todo Isin y Larsa. Aunque Larsa era probablemente más poderosa, Isin se hallaba mejor ubicada, aguas arriba del río Eufrates, por lo que podía impedir que su rival se abasteciese de artículos esenciales: madera, piedra y metal, que se transportaban por el río desde el noroeste. Larsa respondió a ello procurando controlar la zona oriental del valle y asegurarse el acceso al Tigris. Como puesto avanzado de Larsa al norte, Mashkan-shapir creció hasta transformarse en ciudad y convertirse en segunda capital del reino.

La ciudad conservó su importancia tras la derrota de Isin, pues el auge de Babilonia bajo el gobierno de Hammurabi, a comienzos del siglo XVIII a. de C., originó una pugna similar por el control del acceso a los bienes básicos. Sin embargo, las conquistas de Hammurabi, que reunificó la mayor parte del sur de Mesopotamia, quitaron poco después valor estratégico a la posición de Mashkan-shapir. Abandonada hacia el año 1720 a. de C., los canales se fueron deteriorando y Mashkan-shapir desapareció engullida por el desierto.

Hay abundantes datos históricos sobre el tipo de urbe que fue Mashkan-shapir durante su breve período de esplendor. En su calidad de segunda capital de Larsa, era un centro político donde se desarrollaban muchas actividades diplomáticas. Constituía también una puerta por donde había de pasar el comercio fluvial del Tigris. Encerraba, en fin, entre sus muros un gran templo dedicado a Nergal, el dios de la muerte. Dado que la administración, la religión y el comercio eran también las principales actividades de otras urbes mesopotámicas, la organización de Mashkan-shapir habrá de ser muy útil para conocer la de todas ellas.

Emprendimos la exploración inicial en dos campañas trisemanales en 1987 y 1989. Además, desde enero hasta mayo de 1990 pudimos trabajar allí ininterrumpidamente gracias a los apoyos de diversas instituciones estadounidenses. Llevamos a cabo una detenida inspección visual y un reconocimiento aéreo de la superficie para levantar un mapa de los principales rasgos del yacimiento. Además, realizamos algunas catas provisionales para establecer la relación entre los vestigios superficiales y los restos soterrados. Para conocer la geología local, recurrimos a las fotografías tomadas por satélite.

No resultó fácil cartografiar Mashkan-shapir. Los restos de la ciudad apenas forman un *tell* en el sentido tradicional del término. El paraje ha



1988 desde un SPOT francés, un satélite artificial, nos proporcionó una visión más amplia del entorno geográfico de Mashkan-shapir. En esta imagen se aprecia cerca del yacimiento un antiguo cauce del Tigris, lo cual explica por qué la ciudad se construyó a más de 30 kilómetros del curso actual del río. La fotografía muestra también los perfiles de una serie de canales que nacían del río y atravesaban la ciudad.

sufrido el ataque erosivo del viento, que ha reducido a sus cimientos las últimas edificaciones y ha dejado a la vista, en la superficie, los objetos más pesados. Sólo en algunos sitios los contornos del yacimiento se alzan más de dos metros sobre la llanura.

Costaba mucho distinguir, desde el suelo, los trazados de los principales conjuntos arquitectónicos, como el trayecto de la muralla de la ciudad. La verdad es que sólo desde el aire puede observarse buena parte de la muralla circundante a Mashkan-shapir; en algunos sitios ha desaparecido por completo. El reconocimiento aéreo fue esencial para nuestro trabajo. Aprovechamos los fuertes vientos que soplan en la región para elevar una cometa portadora de una cámara fotográfica. Pero la altura de la cometa cambiaba según la velocidad del viento, y así variaba mucho el área incluida en cada fotografía. Sin embargo, nos las arreglamos para compensar estas irregularidades tomando muchas imágenes y sin escatimar las que tal vez resultaran superfluas. Con todo, las 1600 fotografías aéreas que hicimos nos habrían sido de escasa utilidad para trazar el mapa de no haber contado con un programa de ordenador especialmente diseñado para facilitar el análisis de las imágenes tomadas desde un satélite artificial y levantar mapas geográficos y urbanísticos. Nuestro sistema de cuadriculado estaba formado por cuadrados de 50 metros de lado, en cuyos vértices habíamos plantado cruces que fuesen visibles en las fotografías, para poder así orientar las imágenes y compensar las distorsiones geométricas causadas por el bamboleo de la cámara. Una vez corregidas y recompuestas a una escala uniforme, las versiones digitalizadas de las imágenes se reunieron en un mosaico tan detallado que en él podía distinguirse cada ladrillo presente en la superficie del yacimiento.

Combinamos el reconocimiento aéreo con la inspección desde el suelo, basada ésta en el mismo enrejado de 50 metros. Un miembro de nuestro equipo escrutaba a pie cada cuadro e iba marcando con banderines de topógrafo los rasgos más destacados y los objetos que encontraba. Como los fragmentos dispersos de ladrillos, tiestos, escorias de cobre, trozos de cerámica, restos de hornos y de betún eran demasiado numerosos para contarlos, los indicamos en nuestro mapa en forma de concentraciones y no de piezas sueltas. Sobre toda la superficie habría al menos 30 millones de trozos de cerámica de tamaño mayor que el de una uña.

En el curso de nuestra inspección fuimos señalando también en el mapa tumbas, plataformas de ladrillo cocido y de adobe, cortes de canales y restos de la muralla de la ciudad. Y encontramos más de 1200 objetos artesanales: útiles, armas, adornos, partes de estatuas, placas, estatuillas, modelos en miniatura y vasijas enteras. La dispar distribución de estos elementos da una idea de la complejidad cultural alcanzada por esta ciudad de tan corta existencia.

La fotografía obtenida en mayo de

Al igual que todas las ciudades mesopotámicas de la época, Mashkan-shapir estaba rodeada de una muralla de adobe interrumpida por varias puertas. Conseguimos distinguir tres. Dos de ellas, para el tráfico rodado, estaban situadas junto a los canales principales; ello se explica quizá porque, entonces como ahora, los caminos discurrían paralelos a los cursos de agua que servían de líneas vitales de comunicación. Los pilares de la tercera puerta flanquean los muros de un canal; es posible que esta puerta sirviese para regular el caudal del agua o el tráfico fluvial.

Sorprendentemente, la muralla de la ciudad no se construyó al borde mismo del núcleo de población, sino que entre éste y el muro se dejó un espacio libre, a excepción de seis edificios aislados, silos quizá. Muchos textos mesopotámicos indican que el intercambio de mercancías tenía lugar cerca de las puertas de las ciudades, por lo que esa zona pudo destinarse a plaza de mercado. Otra superficie aparentemente desocupada, próxima a un canal, tal vez fuese un parque. Sabemos que algunas ciudades mesopotámicas contaban con esas zonas de recreo porque en un mapa de Nippur, grabado en una tablilla datada pocos siglos después, aparece un amplio jardín situado en uno de los extremos de la ciudad.

La ciudad propiamente dicha estaba dividida en cinco sectores, separados por canales. Una zona central, de forma trapezoidal, estaba rodeada por otras cuatro mayores, al norte, al sur, al este y al oeste. Los sectores más extensos, el septentrional y el oriental, se hallaban a su vez divididos por sendos canales. Dos de las confluencias entre los canales formaban amplios muelles que pudieron funcionar como centros comerciales.

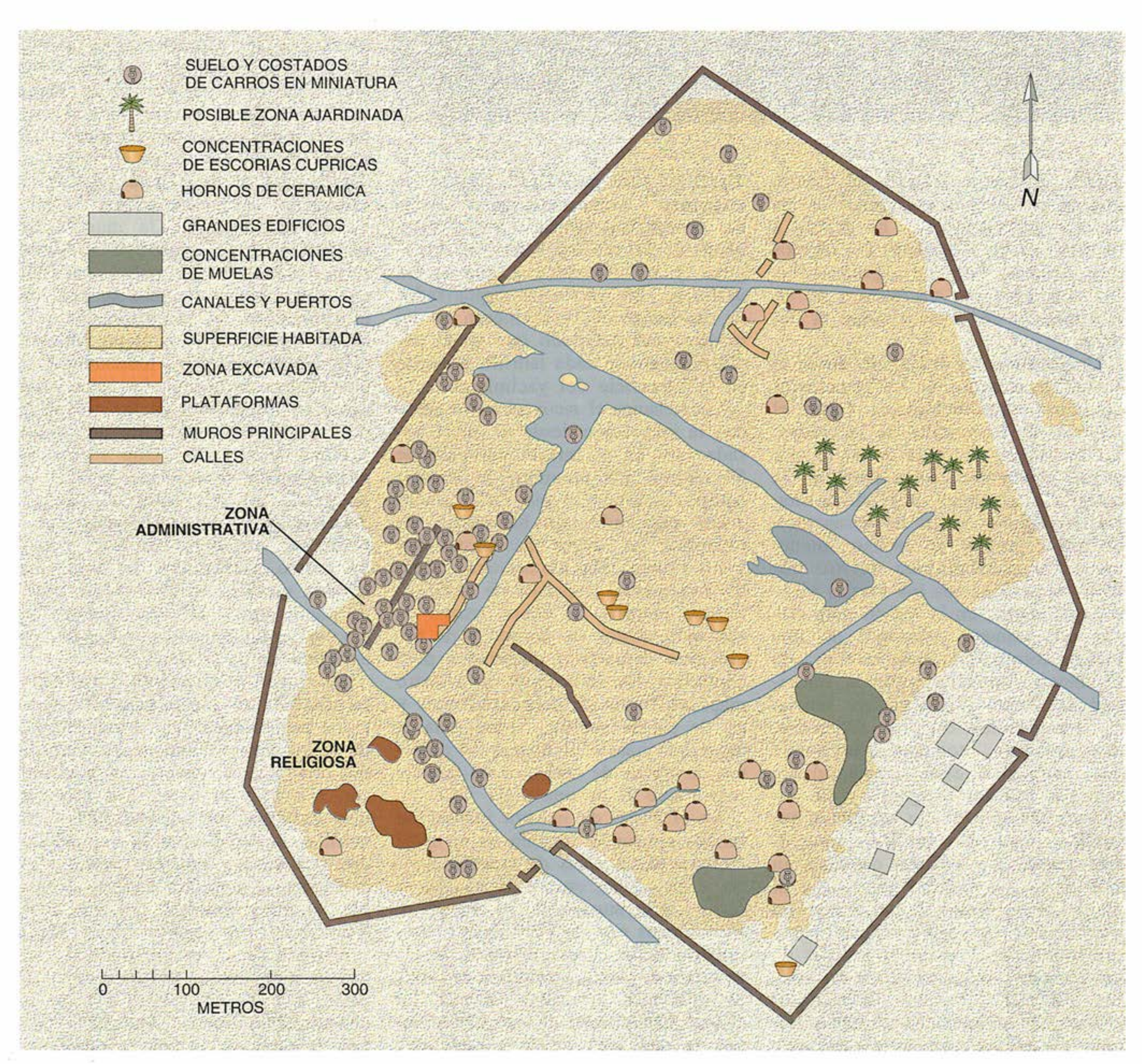
Muchos de los edificios de la ciudad se alineaban a orillas de los canales, que se integraban así en la construcción urbana. Aunque Mashkan-shapir no es la única ciudad mesopotámica dotada, que sepamos, de una estructura de este tipo, en otras la acumulación de depósitos ha ocul-

tado la red original de canales. Las calles, que en otros yacimientos también quedaron cubiertas por los escombros, pueden verse poco menos que al desnudo en Mashkan-shapir. Algunas siguen las líneas de los canales; otras cruzan los barrios. En una de estas últimas pueden verse incluso, cuando llega a un canal, los restos de un puente de ladrillo (o quizá dos muelles). Las excavaciones realizadas en otras ciudades mesopotámicas han puesto de manifiesto que, además de las calles principales, solía haber una red de pasajes que daban acceso a las distintas casas.

Las fotografías aéreas revelan algunas demarcaciones adicionales. Un muro rodeaba parte del sector occidental; otro atravesaba la zona sur del barrio central. Ambos muros muestran cierta semejanza con otro similar descubierto en el interior de Ur, que, ciñendo los principales templos de la ciudad, delimitaba el recinto sagrado.

¿Qué funciones políticas, religiosas, económicas y sociales se desarrollaban en la estructura física definida por las calles, los canales y los muros interiores de Mashkan-shapir? De la atenta observación de sus ruinas deducimos dónde tenían lugar las diversas actividades.

El templo mayor —el de Nergal— era, sin duda, el punto de referencia de la ciudad. Alzado sobre una peana, o zigurat, se divisaba desde muy lejos; constituía un símbolo de poder. Los restos de las plataformas de ladrillo y de adobe que parecen haber constituido la base de los templos más importantes se hallan en el distrito sur, separado de los otros por un canal. El carácter religioso de estos estrados se confirmó con el descubrimiento de 70 fragmentos de estatuas de terracota que debieron de representar, a tamaño natural, figuras humanas, leones, perros y caballos. En aquella época, era frecuente adornar con estatuas de leones los accesos a los templos; sin embargo, los arqueólogos sólo han encontrado figuras humanas y animales más complejas en las ciudades importantes, como Isin.



3. EL AREA URBANA estaba atravesada por varios canales que la dividían en cinco sectores. En la periferia se hallaron restos arqueológicos de actividades religiosas y administrativas. Los talleres en que se elaboraban objetos de piedra, cobre y cerámica estaban dispersos; los caldereros ejercían su actividad en las inmediaciones de la calle principal.

Al otro lado del canal, en el distrito del centro, había otra área con cierto cariz religioso, a juzgar por la existencia en ella de una plataforma, la única hasta ahora descubierta fuera del sector sacro. Esta zona contiene vestigios de numerosos enterramientos y una elevada concentración de elementos funerarios, como alhajas y armas. También está separada del resto del poblado por un muro. La mayoría de las tumbas de otros yacimientos mesopotámicos (y muchas de las de Mashkan-shapir) aparecen en lugares domésticos, por lo que este cementerio parece indicar que un segmento de la sociedad —quizás el asociado al culto o a las tareas administrativas— disponía de un camposanto, probablemente con un templo anexo.

Una tercera zona distinguible dentro de la ciudad era el enclave amurallado de poniente, que parece haber correspondido a un centro administrativo. Contenía una serie de estructuras de construcción muy regular, en nada semejante a la desordenada y aleatoria de las viviendas particulares. Aunque está claro que no pertenecen a un palacio como el de Mari, que data de la misma época, puede que se tratara de edificios destinados a idénticas funciones administrativas. Lo mismo que los palacios de otros sitios, este enclave de Mashkan-shapir se ubica en la periferia de la ciudad. Entre sus ruinas recogimos numerosos sellos de arcilla sin cocer. Estas piezas de arcilla, con impresiones de sellos de piedra esculpida, se adherían a las sogas con que cerraban las puertas o se incrustaban en el material con que tapaban las vasijas en los almacenes, a la manera de los sellos que lacran las cartas. Carecen de uso en el ámbito doméstico.

En el mismo enclave hallamos una concentración de modelos en miniatura de carros decorados con representaciones de los principales dioses de la ciudad, Nergal y Shamash, dios del sol. Es difícil adivinar para qué servían, qué función desempeñaban estos vehículos de dos ruedas. Su abundancia en un recinto oficial descarta la hipótesis de una función lúdica infantil. Tal vez sirvieron para representar a esos dioses en la toma de juramentos y otros actos de fe pública.

No distinguimos en Mashkan-shapir otras áreas con vestigios de construcciones especiales. Todos los objetos hallados en las demás zonas del asentamiento entraban en la categoría de uso doméstico: figurillas, armas y utensilios de pequeño tamaño, adornos vulgares (por ejemplo, anillos de concha), así como vestigios de casas y enterramientos.

Es probable que las calles principales y los canales más anchos dividieran este gran espacio urbano en barrios residenciales; si así fue, no existió entre ellos segregación en razón de la riqueza o estatuto social. Se desprende de la dispersión uniforme de los cuencos de piedra y los objetos metálicos, elaborados a partir de materiales importados. Los sellos cilíndricos —distintivos de oficio y de considerable valor en sí mismos— se encontraban también uniformemente dispersos.

Las labores de manufactura se realizaban por doquier. En el sector suroriental de la ciudad, a sotavento, parece haberse dado una ligera concentración de hornos, para fundición del cobre y alfarería, si bien los talleres artesanales están rodeados de viviendas residenciales. Ninguna sección del yacimiento podría llamarse en propiedad barriada obrera. Aunque los caldereros —cuyos talleres se distinguen por la concentración de escorias cúpricas— ejercían su comercio en torno a la calle mayor del sector central, es en la parte suroriental donde predominan las piedras decorativas y las muelas utilizadas para su elaboración. Los desechos de cerámica y los vestigios de hornos señalan la existencia de dos centros principales de alfarería, uno al norte y otro al sureste, ambos concentrados en las inmediaciones de los pequeños canales que atravesaban aquellas zonas. La distribución espacial de la industria artesanal ofrece el mismo aspecto descentralizado que la de las viviendas y los objetos.

De nuestra inspección de Mashkan-shapir no se obtiene ninguna prueba que avale la hipótesis centralista de las ciudades mesopotámicas, ni tampoco la jerarquización de su organización social. Cierto es que identificamos centros destinados al culto y a la administración, pero estaban confinados en la parte meridional del yacimiento y separados entre sí y del resto de la ciudad por los canales principales. Además, estos centros de poder en potencia se hallaban lejos de las zonas comerciales, como los muelles o las puertas de la ciudad. La producción de bienes parece haber estado en manos de artesanos que ejercían su trabajo en barriadas habitadas por el pueblo y las clases dominantes.

La organización general de Mashkan-shapir coincide con lo indicado en las fuentes documentales respecto a la amplia participación de los ciudadanos mesopotámicos en la configuración de sus relaciones de poder.









4. LOS HALLAZGOS arqueológicos de Mashkan-shapir dan fe de la riqueza de su vida social. El sello cilíndrico (*a*), de cornalina importada, pudo haberse utilizado para sellar documentos oficiales; los fragmentos de maquetas de carruajes (*b*) quizá desempeñaran alguna función en la toma de juramentos; el arpón de cobre (*c*) servía para pescar en los canales o en los ríos; por último, la placa de terracota con la imagen de un león (*d*) hubo de decorar algún edificio notable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TELL ABU DUWARI PROJECT, IRAQ, 1987. Elizabeth C. Stone en *Journal of Field Archaeology*, vol. 17, n.º 2, páginas 141-162; verano de 1990.

EARLY MESOPOTAMIA: SOCIETY AND ECONOMY AT THE DAWN OF HISTORY. J. Nicholas Postgate. Routledge, 1992.

THE TELL ABU DUWARI PROJECT, 1988-1990. Elizabeth C. Stone y Paul Zimansky en *Journal of Field Archaeology*, vol. 21, n.º 4, págs. 437-455; invierno de 1994.

La ecología, entre la vida real y la física teórica

En la búsqueda de un estatuto científico para la ecología se sugiere una reinterpretación de la forma usual de introducir la noción termodinámica de entropía

Ramón Margalef

Se quejan los ecólogos de la trivialización que sufre su disciplina en los medios de comunicación, confundida con un sentimiento ambientalista hoy de moda. Parte de la culpa, sin embargo, podría recaer en la configuración aparente de la ecología, que se diría falta de coherencia interna y nervio teórico.

Conviene, digámoslo de entrada, considerar los organismos y los sistemas formados por éstos en un ambiente de características definidas, los ecosistemas, como si de máquinas se tratara. O con mayor propiedad, como sistemas disipativos abiertos, al estilo de una llama o de un tornado. Organismos y ecosistemas desarrollan trabajo a partir de diversas energías, entre las cuales la más importante es la solar, que en la vida se convierte pronto en energía de los enlaces químicos. En los ecosistemas, además, no puede prescindirse de la energía del clima (viento, movimientos de agua). Este artículo parte de esas exigencias elementales, con un triple propósito.

En primer lugar, queremos señalar que hay dominios, dentro de la ecología, en los que la aproximación académica al uso, que suele valorar exageradamente la asimilación de los compuestos de carbono por los organismos y las relaciones entre depredador y presa, no basta para responder ni a lo que pide cualquier descripción teórica eficaz, ni a las exigencias prácticas de manipulación o intervención humana.

En segundo lugar, no resulta fácil para el ecólogo preparar balances correctos de entradas y salidas de energía para aquellos organismos que pueden utilizar un espectro energético muy amplio, incluidas las energías externas, o exosomáticas; estas energías suelen operar en un espacio periférico a los organismos, aunque generalmente interior al ecosistema, espacio del que las especies se apropian o asimilan en grado diverso. Se trata de un aspecto crucial. Pensemos, por ejemplo, en el retorno de agua a la atmósfera, a través de las plantas de un bosque, es decir, en la energía de evapotranspiración. Este proceso de intercambio gaseoso puede organizarse a la manera de un conjunto de células de Bénard que estuvieran dotadas de una rigidez especial de origen histórico, mantenida, en este caso, por la posición de los troncos. (Las células de Bénard son celdillas convectivas con una geometría de prismas poligonales de eje vertical que se forman espontáneamente cuando una capa delgada de fluido, con una superficie libre y horizontal, se calienta por debajo.) Un modelo, quizá más general, de cooperación entre energías diversas está presente en la continuidad de la vida suspendida en el agua; la persistencia de individuos allí depende del retorno de elementos nutritivos a la parte iluminada de la columna de agua, que, a su vez, es función de los movimientos del agua, en remolinos o en otras formas de circulación.

En tercer lugar, según una importante línea de pensamiento que nos viene de la física teórica, para reconocer como información cualquier cambio asociado a una disipación de energía, se requiere un observador que levante acta. En propiedad, el observador será un organismo vivo, y lo que hemos llamado levantar acta, expresión sinónima de asimilar o integrar una información, acota probablemente lo más característico de la vida en su escala de dimensiones mínima: el cuanto de energía que se reconoce como el mínimo elemento de cambio y, por tanto, potencialmente de información.

Delimitemos ahora la situación. La ecología de las poblaciones ha alcanzado un desarrollo satisfactorio y ofrece un entramado teórico adecuado para entender las relaciones entre individuos de una misma especie o de diferentes especies; conocimiento que podemos luego aplicar, por ejemplo, tanto en una explotación racional, como en las tareas de conservación de especies amenazadas, selectas y definidas.

Situémonos a una escala superior a la anterior en varios órdenes de magnitud. En un nivel de carácter global y discontinuo con el precedente. Encontraremos allí los problemas que conciernen al efecto invernadero, los déficits locales de ozono en las altas capas de la atmósfera, las fluctuaciones climáticas pasadas y las que son esperables, así como sus efectos previsibles sobre la biosfera. Se trata de cuestiones de planteamiento científico y resolución, cuando se ha logrado, recientes, en las que han intervenido la observaciones desde el espacio, el estudio de los indicios basados en isótopos y numerosos testimonios paleontológicos.

En medio de ambas escalas, la poblacional y la planetaria, existe un segmento que se caracteriza por el divorcio entre lo que dice saberse y lo que se es capaz de llevar a la práctica. Es el ámbito donde se sitúan las cuestiones concernientes a la composición y la dinámica de la ma-

RAMON MARGALEF es profesor emérito de la Universidad de Barcelona, donde inauguró la cátedra de ecología. Renovó la disciplina con la introducción de la teoría de la información. Ha recibido numerosos galardones internacionales por su aportación a la limnología, oceanografía y ecología. Este es el tercer artículo que escribe para *Investigación y Ciencia*.

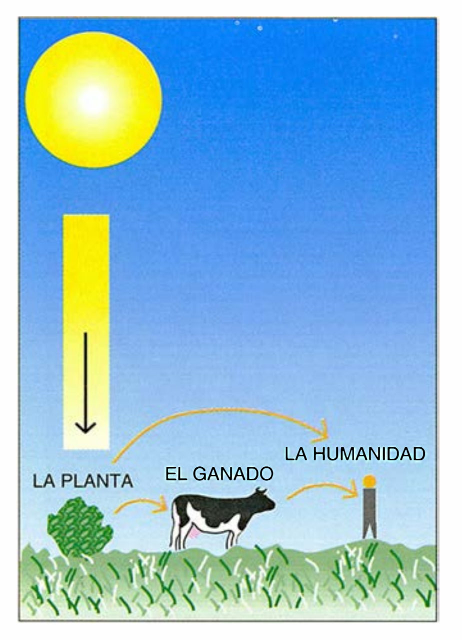


1. EN EL ECOSISTEMA, los individuos de distintas especies y cuyas funciones se entrecruzan de manera diversa, presentan ciertos rasgos comunes en sus "maquinarias" respectivas, que derivan de un parentesco más o menos lejano o de una compatibilidad probada a través de la historia. (Tomado de *Concealing Coloration in the Animal Kingdom*, 1909, de Gerald H. Thayer.)

yoría de los ecosistemas: bosques, ríos, prados, muchos aspectos de la agricultura, etcétera.

La exposición de la teoría ecológica desarrollada en los manuales académicos al uso suele ser correcta y aplicable al dominio individual y poblacional. Se analizan y presentan modelos sobre las relaciones entre organismos, aunque por lo común limitadas a dos: las que se establecen entre depredador y presa y las relaciones de competencia; ejemplos familiares del sistema depredador-presa son el parásito y el hospedador, la vaca y el prado, el banco de peces y la flota pesquera; se dan relaciones de competencia cuando dos especies pugnan por un mismo recurso. Ambos modelos, el sistema depredador-presa y las relaciones de competencia, se extrapolan a las cadenas alimentarias y a la conectividad de redes tróficas. Las cadenas alimentarias —el herbívoro que vive de la vegetación, el carnívoro que persigue al herbívoro y es víctima, a su vez, del supercarnívoro o del parásito— no suelen constar de más de tres o cuatro eslabones, aunque en ocasiones llegan a seis y siete, y las trayectorias convergen o divergen en grado diverso constituyéndose un sistema reticulado de flujos.

Pero semejante procedimiento analítico apenas es practicable y no nos sirve, generalmente, en la consideración de los ecosistemas o de segmentos amplios de ecosistemas. Y es justamente en ellos donde debe centrarse el foco de la teoría ecológica. No porque tengan una entidad privilegiable, sino simplemente porque representan el espacio mínimo de acciones y reacciones de interés teórico. Hasta hace poco, ni el espacio ni la distancia recibían atención cuando se trataba de idear modelos sobre poblaciones interrelacionadas. Daba la impresión de que los ecólogos, imitando a los medievales que disputaban acerca de cuántos ángeles podían danzar en la punta de una aguja, confinaban, con excesiva ligereza, ecosistemas enteros en un solo punto. La



2. ESQUEMA SINOPTICO que ilustra las complicadas vías de la energía eficaz en la biosfera. Se destacan de intento aquellos grupos de organismos que, independientemente de su posición en el sistema general de relaciones de descendencia o parentesco, han desarrollado una sustancial capacidad de manejo de energías exosomáticas, las "energías alternativas del entorno", que no son ni la luz ni la energía de los enlaces químicos.

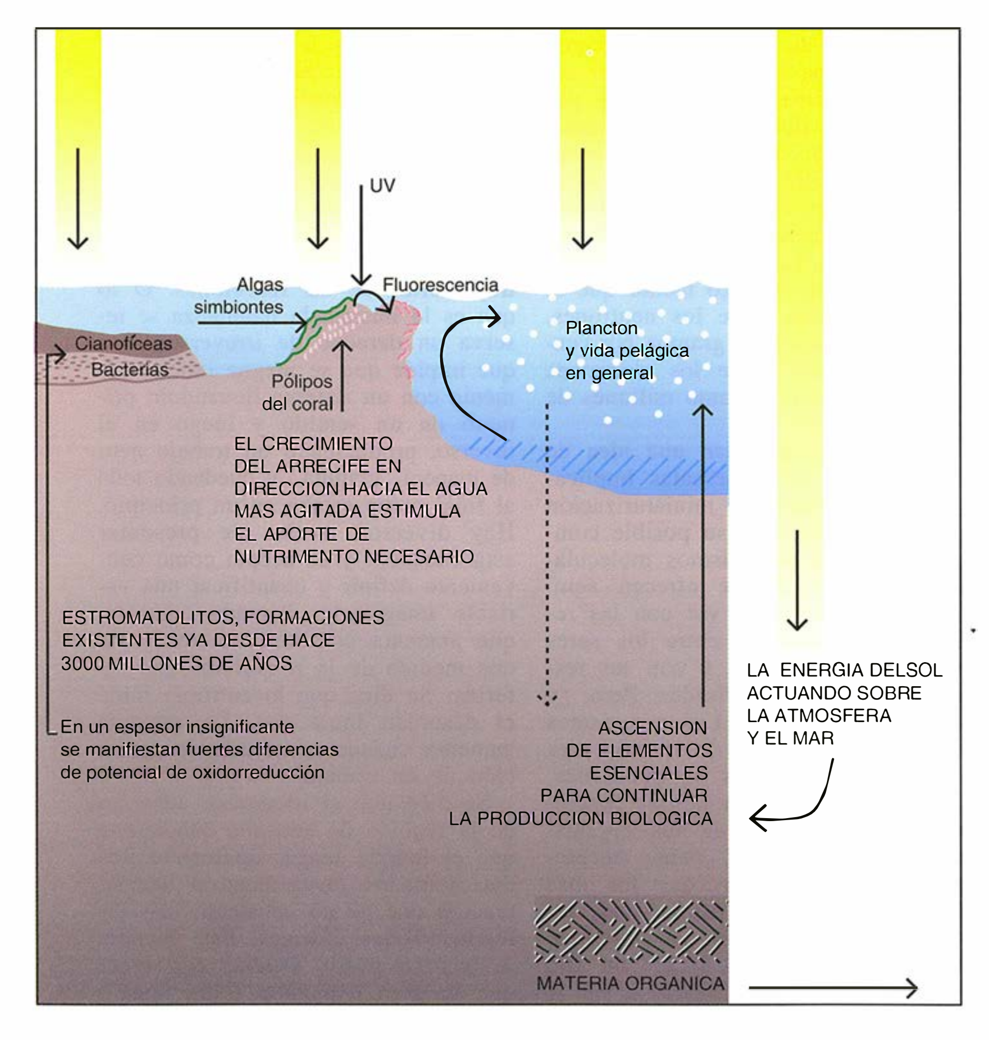
situación ha cambiado con la introducción generalizada de los ordenadores, que permiten realizar simulaciones y análisis más realistas sobre dameros de dos y tres dimensiones. Pero todavía se está en una fase descriptiva y raramente se examinan las implicaciones termodinámicas.

Esta representación tendenciosa, por parcial, de los acontecimientos tiene cierta explicación: la propia complejidad de la naturaleza, que hace difícil una aproximación rigurosa a la misma. Arrastra también su lastre, porque la ecología ha repudiado a dos de sus hijas, la fitosociología (o estudio jerarquizado de las agrupaciones vegetales y sus relaciones con el medio) y la biocenología (que estudia asociaciones de especies vinculadas por alguna función), estigmatizadas con una supuesta debilidad conceptual. Pero la ecología no se ha preocupado por renovar o reforzar el aparato teórico de las mismas, en lo que podía tener de aprovechable, sino que se ha limitado a dejarlas de lado.

Nada más necesario que acotar en los modelos, por simples que sean, los límites periféricos de los *organismos dominantes*. Las plantas vasculares producen madera, un material muy resistente a diversos agentes de descomposición, que sigue empleándose en el ecosistema como elemento de transporte y soporte incluso después de su muerte, amén de permitir que cada unidad superior desarrolle una forma diferente y adaptativa, perdurable a lo largo del tiempo. El tronco y las raíces constituyen, además, un banco genético relativamente estable, cuyas consecuencias se reflejan en la evolución lenta o peculiar de muchas estirpes arbóreas. Cuando algunos ecólogos han propuesto descomponer cada planta vascular en unidades, equivalentes a los individuos que constituyen la unidad natural al uso en ecología animal, han logrado ampliar el campo de aplicación de algunos modelos matemáticos, pero rinden un flaco favor a la ecología, pues desvían la atención del auténtico problema: tratar al árbol como sujeto dominante en muchas de sus relaciones con otras plantas y con el medio.

Las plantas vasculares no son un caso singular. Corales y otros animales coloniales, insectos más genuinamente sociales (eusociales), estromatolitos, quizá los hongos y, por supuesto, la humanidad, ofrecen problemas muy parecidos y comparten idéntica importancia en la configuración de la biosfera. Se trata siempre de organismos dominantes en sus respectivos ecosistemas, que, por ello, tienden a deprimir la diversidad en sus niveles respectivos e incluso en otros próximos, como es palmario en las hormigas, los árboles y, no digamos, en la humanidad.

La apropiación del espacio periférico admite muchas modalidades y todas ellas influyen de manera generalmente muy importante en la vida de muchos más organismos, que se convierten en clientes, en simbiontes explotados e incluso en comensales o parásitos estrictos. Hay que tener presente que toda la organización que se establece mediante tales relaciones tiene una expresión espacial, que contribuye a organizar el espacio en todo ecosistema.



Existe reticencia a salir de las relaciones binarias más sencillas (depredador-presa, por ejemplo) y pasar a contemplar la interacción simultánea entre muchas entidades. Es una incomodidad como la que sienten los físicos ante el problema de los tres —o más— cuerpos. El caso es que se ha descuidado el análisis del significado del espacio periférico de los organismos y de las energías que en él operan. En efecto, los ecólogos han venido ciñéndose al cálculo de la energía almacenada en los materiales sintetizados o en los alimentos ingeridos, medida con calorímetro, y, acaso, la energía invertida en la respiración. El espacio y la distancia no solían entrar en los modelos de poblaciones interactuantes. Dicho de otro modo, los ecosistemas no acababan de considerarse como sistemas físicos.

Recordemos, a este propósito, las dificultades encontradas por los enfoques termodinámicos. A nadie se le ocurría si habría en ecología un correlato de la aceleración, que era lo que cabalmente cabía esperar como respuesta a una fuerza (la producción biológica) más o menos constante, o por lo menos incesante, ni si debíamos admitir que las tendencias al cambio de los ecosistemas —reflejado, por ejemplo, en el fenómeno de la sucesión de las comunidades— se ajustaban a algún principio variacional. Lo chocante del caso es que en 1937 Vito Volterra (1860-1940), el que fuera principal introductor del estudio de las relaciones binarias, había sentado ya un precedente. Poquísimos ecólogos se enteraron de su empeño y, muchos menos, se aprestaron a someterlo a prueba.

H. T. Odum, el ecólogo que mayor esfuerzo ha dedicado a descifrar la circulación de energía y el clima energético que reina en los organismos y su periferia, ha recibido duras críticas. Vale la pena recordarlo cuando algunos proponen la idea, supuestamente novedosa, de los organismos como ingenieros de los ecosistemas, es decir, que operan sobre el entorno y orientan de diversas maneras las energías que allí fluyen.

En mi opinión hay que ir más hondo. Ha llegado el momento de tomar seriamente a organismos y ecosistemas como sistemas físicos. La vida, fenómeno cósmico, aparece asociada o se manifiesta en sistemas físicos caracterizados por una gran complejidad estructural, explícita en sus componentes últimos, en su miniaturización: cada molécula cuenta. Son máquinas, sistemas mecánicos, a escala molecular. Quizás, andando el tiempo, podamos intentar fijar un límite mínimo a esta clase de sistemas físicos, cifrado en la cantidad de materia que basta para atribuir o dar significado a nueva información.

Esta aproximación física debe completarse con un enfoque histórico e informático. La agregación de nueva información es un proceso histórico. La vida es inseparable de la historia, desde los virus, que ocupan secundariamente el nivel inferior de complicación. La evolución sigue un curso histórico; el desarrollo de cada organismo es un proceso histórico. La propia sucesión ecológica representa la integración, a lo largo del tiempo, del devenir de los organismos de especies distintas que, en determinados aspectos, se complementan unos a otros en sus funciones.

El recurso a la informática, de la mano de los avances en física, aunque permite acometer un planteamiento conceptual más riguroso de la ecología, no importa tanto porque resuelva los problemas, cuanto porque plantea otros, da una visión panorámica de la sucesión de complejidades y ofrece un atisbo de lo que podría aparecer con impresionante armonía. Convirtiéndose, además, en una eficaz lectura complementaria de la descripción que aporta la biología molecular.

Sabido es que durante siglos se creyó que las especies surgieron o se crearon cada una de forma independiente. Desde Darwin, por lo menos, se acepta que la cadena de antepasados y descendientes expresa el resultado de la evolución. Cada especie puede caracterizarse como un sistema informático, con su circuitería ("hardware") y su programación ("software"), diseñadas a escala molecular, y repetidas en un gran número de copias que no son ni permanecen idénticas.

A una escala mayor, se mezclan y combinan entre sí poblaciones de organismos de distintas especies. Este nivel de organización coincide, a grandes rasgos, con el de nuestra observación macroscópica. Podemos aceptarlo como nivel de ecosistema. Nuestros órganos están adaptados para vivir en ese marco de referencia, en el que nos sentimos integrados. En el ecosistema, los individuos, de distintas especies y cuyas funciones se entrecruzan de manera diversa, presentan ciertos rasgos comunes en sus "maquinaria" respectiva, que derivan de un parentesco más o menos lejano, o de una compatibilidad probada a través de la historia, posibilitan su interacción y explican ciertas relaciones compatibles de tamaño y función.

La actividad de los sistemas físicos y su capacidad como portadores de información guardan relación con su escala de dimensiones. Los virus miden generalmente entre 0,05 y 0,02 mm (un micrometro es la millonésima de metro); y, en otras unidades, las dimensiones indicadas son entre 50.000 y 200.000×10^{-10} m. En el átomo de hidrógeno, el diámetro que define el espacio dentro del cual los electrones pasan el 99 por ciento de su tiempo es, aproximadamente, de $0,5 \times 10^{-10}$ m. El radio del núcleo de dicho átomo es unas 100.000 veces menor que el del átomo mismo. El hidrógeno es el átomo más pequeño. La densidad de los núcleos atómicos es algo menor que la de los protones o de los neutrones, que es de $2,8 \times 10^{14}$ gramos por centímetro cúbico; la de los electrones puede considerarse como millones de veces mayor.

Estas cifras nos dan una idea de la magnitud de las escalas implicadas y el grado de miniaturización que consienten, con su posible complicación, los mecanismos moleculares. Con ese fin se ofrecen aquí. Todo ello tiene que ver con las relaciones de tamaño entre los seres vivos y las estrellas, y con sus respectivos estados de fluidez. Pero, ¿y con la información? Los organismos manejan magnitudes de átomos para arriba, con algunas restricciones. Aunque la evolución de las funciones físico-químicas de los organismos ha incorporado, como necesarios, átomos mayores que los más frecuentes, su participación, más escasa, va unida a una especificidad funcional y, por ello, tienen un alto valor informativo.

En efecto, la naturaleza tiene un aspecto dual, el de la materia condensada —archivo de información, en potencia al menos— y la energía. Materia y energía son intertransformables, de acuerdo con la famosa ecuación einsteiniana, $E = mc^2$. La energía no soporta estáticamente la información, aunque puede transmitirla a distancia, al interactuar con otros sistemas materiales apropiados. La estructura física del mundo impone restricciones fundamentales a las dimensiones mínimas de los organismos y de sus estructuras.

A una escala mayor observamos que los cambios materiales son la respuesta a fuerzas: una fuerza constante, pensemos en la producción primaria de los organismos fotosintetizadores, determina una aceleración, pero raramente se habla de aceleración o deceleración en ecología. No obstante, su interés en determinados dominios resulta inmediato. Sea el caso de la diversidad, como expresión del número de especies y abundancias relativas de las mismas en determinado espacio. Cualquier aceleración "devora" la diversidad biológica, mientras que la deceleración permite que aumente. De ello, y de otros fenómenos comparables, se infiere la necesidad, o por lo menos la conveniencia, de que la ecología busque en la física una fuente de inspiración.

Veámoslo en la termodinámica. Desde la primera mitad del siglo pasado, se acepta que, en cualquier sistema dotado de cierta complejidad, no es posible invertir todas las trayectorias de las reacciones. O lo que es lo mismo, la naturaleza se reserva un derecho de irreversibilidad que impide que se juegue indefinidamente con un sistema llevándolo primero en un sentido y luego en el inverso, produciendo un trabajo neto de manera "gratuita" y quedando todo al final como estaba en un principio. Hay diversos modos de presentar esta cuestión, y se acepta como conveniente definir y cuantificar una variable imaginaria, llamada entropía, que aumenta con los cambios y da una medida de la irreversibilidad referida. Se dice que la entropía mide el desorden molecular. La entropía aumenta cuando acompaña la ejecución de un trabajo.

Se dice que el inevitable aumento de la función de entropía condiciona que el mundo tenga, fatalmente, los días contados, hasta alcanzar una situación que ya no consienta más diferenciaciones eficaces. Esta manera de ver se puede asociar con creer que la gran explosión ("big bang")

contribuyó con una heterogeneidad potencial al principio, preñada de la posibilidad de aumentar mucho la función de entropía, siguiendo un camino escogido en cada momento entre muchas posibilidades. Esta trayectoria es única y se actualiza a través de un trabajo físico realizado en el universo tal como lo vemos.

Ahora bien, ningún acontecimiento pasa sin dejar huella. Y, por supuesto, lo que, por un lado, se contabiliza como un aumento de la función de entropía, se puede reconocer, en otro aspecto, bajo la forma de alguna modificación en la estructura material en cuyo seno se ha producido el cambio irreversible, es decir, la creación de historia. El truco para aumentar la organización propia consiste en hacerse el centro o el escenario de un proceso irreversible, importar material "más ordenado" y expulsarlo "menos ordenado", y aprovechar la diferencia entre las ordenaciones respectivas de entrada y salida para conseguir algún trabajo, como en una máquina de vapor o en un motor de explosión, o para aumentar la riqueza de estructura, o la "información" del sistema local.

Para mantener y aumentar la información que contiene, un ordenador ha debido disponer de un suministro de electricidad, que equivale a un aumento de la entropía del sistema más amplio. Para fabricar el aparato, hubo que disipar energía; la introducción y manipulación de datos requieren nuevo consumo de energía eléctrica —un flujo de electrones. Todo ello va unido a un aumento de la entropía del universo, pero puede considerarse irrelevante: si no aumentara en este menester, aumentaría en cualquier otro cambio, de menos sustancia que nuestro programa, según solemos creer.

Organismos y ecosistemas adquieren y conservan su información, así como las características y propiedades que deben a la misma. Constituyen también el centro de cambios que se manifiestan en forma de un aumento de entropía en un espacio que abarca, además de los organismos, todo un sistema periférico, si no a éste de manera más particular. Se ha repetido hasta el límite la expresión de Erwin Schrödinger según la cual los organismos se alimentarían de entropía negativa. Para nuestro propósito, esto indica que la entropía calculable sobre la irreversibilidad de las reacciones que tienen lugar en los organismos, y no sólo en ellos, también en su periferia, se recupera en forma de un aumento de información, o posibilita el aumento de su organización. No se puede asegurar formalmente que existe una información que no se utiliza. Manifiéstase la información genética cuando opera sobre ella la selección natural, que ejecuta el experimento decisivo.

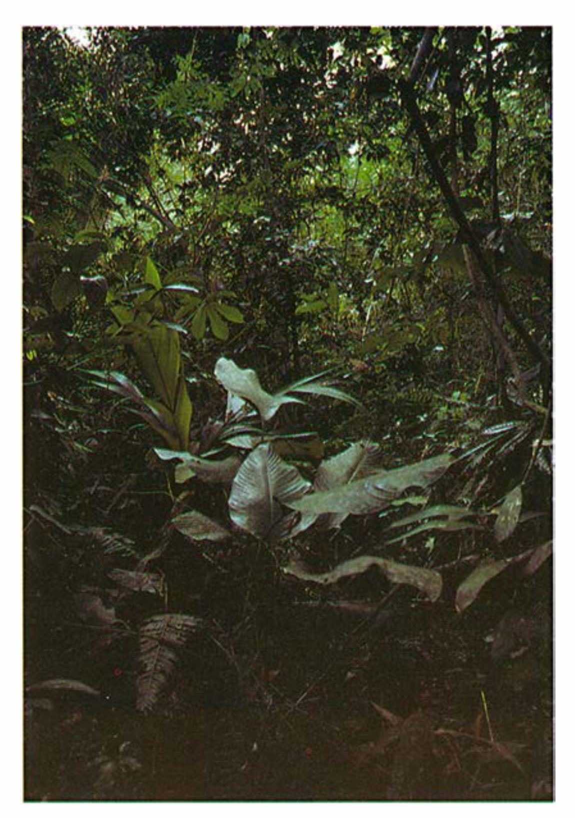
El número de posibilidades de aprovechamiento de la información que se ofrece es infinito. Sería razonable formular un principio de optimización en el sentido de postular que la vida se caracteriza por una selección y evolución en todos los niveles, hacia la consecución de las estructuras y formas de organización que hacen probable —y esto se pone a modo de ejemplo especulativo— un cambio más favorable en imaginarios trueques futuros de entropía por información. Un principio variacional quizás equivalente al de optimización, y aplicable a un ecosistema, podría tomar la forma de describir la trayectoria de que, en un tiempo mínimo, lleva a unas proporciones finales y estables (expresivas de la máxima información global) de las especies

3. CONJUNCION O ACOPLAMIENTO de un sistema disipativo con un sistema autoorganizativo. Ambos sistemas se superponen desigualmente: el sistema digestivo es "más disipativo", el sistema nervioso es "más autoorganizativo"; esta diferencia se extiende a la organización infracelular. El mismo contraste prosigue en los ecosistemas; en el entorno de los individuos, se extiende un espacio en el que son efectivas las energías que llamamos exosomáticas y donde se pueden situar construcciones y artefactos exosomáticos, como los fabricados por nuestra especie, pero también los arrecifes de coral y los termiteros, por ejemplo. Una llama es ejemplo de una estructura disipativa que, por alcanzar alta temperatura, apenas consiente avanzar en la vía de la autoorganización; son dificultades de otro tipo las que quitan poder organizador duradero a un tornado.

componentes. Volterra propuso una elegante fórmula aplicable a la tendencia esperable en la composición por especies de un ecosistema, que se manifestaría a medida que pasa el tiempo.

$$A = \int -\sum_{n=1} a_i N_i \log N_i \, dt$$

A través de estos razonamientos, u otros del mismo tenor, llegamos a una cuestión fundamental: ¿qué es lo más importante en los procesos de autoorganización que se realizan en organismos y en ecosistemas? Cada situación demandará su respuesta. En términos generales puede tener valor el modelo o la conjetura que presenté hace muchos años, según la cual la parte que se renueva más rápidamente en un ecosistema sustenta las estructuras próximas que tienen una tasa de renovación más baja. Lo que equivale a decir que la parte con menos información, en relación con la velocidad con que aumenta o se "produce" entropía, alimenta a la parte que ya se caracterizaba por una mayor densidad de información.



4. FOTOGRAFIA DE UNA SELVA tropical, sin duda la imagen más representativa de la eficacia de la captación de energía solar para la síntesis química. Pero la energía invertida en la ascensión del agua y de los nutrientes en ella disueltos es aún mayor y procede de la evapotranspiración. Parte del calor absorbido por la clorofila refuerza la evapotranspiración; la acumulación de una gran cantidad de materia verde permite hacer sombra a las plantas de menor altura y competir eficazmente con ellas. El sistema de soporte y transporte está constituido por material duradero (madera) y ha evolucionado en el sentido de hacerse resistente a los múltiples agentes de destrucción prehumanos, aunque no al hacha, ni a la sierra mecánica ni al fuego intencionado.

Si este principio fuera cierto, aumentaría con el paso del tiempo el gradiente de la densidad de información, desde la periferia o parte de más intenso metabolismo, en organismos y ecosistemas, hasta las partes cuya base material se renueva más lentamente y que forma el centro de acumulación y de reserva de información. En tal caso, el principio de la entropía no es un factor de uniformización del universo, sino todo lo contrario: es garantía de su diferenciación y de su progresiva organización. Esta regularidad que formulé de manera provisional y que ahora me sigue pareciendo aceptable es lo que K. Matsuno llamó en 1978 el "principio de Margalef", con referencia al ecosistema, un honor inmerecido, porque tal especulación surge por necesidad en cualquier intento de explorar la operación de los principios físicos en la vida y en los organismos.

Los organismos que controlan fuertemente el mundo circundante, desde el punto de vista energético, desarrollan una corteza de topografía ideal complicada, en la que a las energías exosomáticas se corresponden órganos exosomáticos, desde los utensilios más simples, extensión de los apéndices del cuerpo, hasta los robots y los llamados organismos de segundo orden, con evolución propia (vehículos, instrumentos musicales, máquinas herramientas y ordenadores).

La ventaja del superviviente no está en que pueda dejar más descendientes, sino en que puede mantener mayor información efectiva sobre el tiempo, asociada a una "producción de entropía" relativamente menor, lo cual puede significar producir menos descendientes. El principio que L. van Valen denominó en 1973 de la Reina Roja toma su nombre de un personaje de *Alicia en el país de las maravillas*, quien declara que hay que correr todo lo posible para mantenerse en el mismo sitio. Este correr más significaría generar mayor entropía. Pero concuerda mejor con los datos disponibles aceptar que la evolución en condiciones relativamente estables y persistentes de competencia intensa conduce a una gran parsimonia en el metabolismo y en la procreación. El correr sólo se justifica en cancha abierta, es decir, cuando es posible desarrollar mucho trabajo y no hay competidores. Cuando el aumento de entropía contribuye muy poco a la competencia, porque hay muchos recursos, se manifiesta la estrategia del despilfarro. Que puede tener también otro sentido: impedir que otros utilicen el recurso. Globalmente parece razonable admitir que la vida elige el camino de la parsimonia.

Existen condicionamientos que a menudo se olvidan. La adición de la misma cantidad de información a sistemas distintos enriquece más a aquellos sistemas que, para empezar, ya contenían mayor información. Las informaciones no se suman, sino que se multiplican. El habernos acostumbrado al uso de ordenadores y de sus programas nos convence fácilmente de que una "unidad" de información vale más si se introduce en un programa ya muy complicado que si se introduce en otro más simple. De manera que los sistemas —organismos— mayores disfrutan de ventaja.

Estos últimos párrafos conducen a proponer que los sistemas físicos heterogéneos, y probablemente todos lo son, están diferenciados a lo largo de un gradiente entre una parte más disipativa, que realiza trabajo y, por tanto, contribuye a un aumento general de entropía, y una parte autoorganizativa, mantenida o pagada por aquélla. Una llama, un tornado, son sistemas disipativos, cuya estructura es fugaz. La alta temperatura que existe en la llama no es propicia para la acumulación de estructura o información. Si recordamos la expresión de la entropía, en ella entra la temperatura absoluta: una acumulación progresiva de información sólo es posible a temperatura relativamente baja.

La noción de sistema termodinámicamente abierto, que intercambia materia y energía con el mundo exterior, de manera que adquiere y mantiene estructuras, idea desarrollada por Ilya Prigogine y su escuela, resulta perfectamente aplicable a los sistemas vivos. Lejos del equilibrio termodinámico, se crean nuevos estados de organización. Complementario de este aspecto disipativo es su aspecto autoorganizativo o autopoyético, capaz de recuperar, en información persistente, una fracción *progresivamente* creciente —y esto puede ser lo más característico de la vida y de su evolución— del equivalente de la entropía

producida. Quizás es mejor hablar de aspectos de un mismo sistema que de sistemas diferentes, porque se hallan íntimamente superpuestos, aunque es indudable que en ciertos territorios de los organismos predomina el aspecto disipativo y, en otros, el autoorganizador.

A pesar del adverbio subrayado antes, creo que es difícil decidirse a favor de un progreso en el sentido de mera complejidad morfológica creciente que se le ha venido concediendo a este concepto desde la *Naturphilosophie* alemana y que es usual en los escritos de Hegel, Spencer, Bergson, Teilhard de Chardin y otros.

El estudio de los ecosistemas proporciona muchas imágenes del acoplamiento entre un sistema disipativo y un sistema acumulador de información, aunque sus fronteras, en la medida en que existan, no estén muy definidas. Esto explica las dificultades que han tenido los ecólogos en su deseo de contabilizar las partidas que deben introducir en sus modelos.

Tradicionalmente, los ecólogos han contabilizado las energías y el trabajo a través de la fisiología. Por ejemplo, puede medirse el metabolismo, o bien apreciar en un calorímetro el trabajo realizado en joules en un material sintetizado. Si hablamos de las plantas vasculares terrestres, conviene pensar no sólo en la energía luminosa, sino también en la energía de la evapotranspiración. Igualmente, en la humanidad actual, a la energía de los alimentos ingeridos hay que añadir la energía exosomática que mantiene nuestra civilización y permite una gran acumulación, también exosomática, de información, en forma de la reorganización del paisaje y de la creación de miríadas de artefactos.

La esperanza de desarrollar modelos energéticos correctos y sencillos se esfuma, en parte, porque, como saben los ingenieros, la conversión de la energía útil varía según la calidad inicial de la energía disponible y las características de la máquina en la que se desarrolla el trabajo. Existen grandes dificultades para calcular la energía invertida en los procesos ecológicos e integrarla sobre el tiempo. Pero así son las cosas.

Parece indiscutible la propensión a recuperar, como información, en el lado autoorganizativo de la maquinaria de la vida, una fracción del equivalente a la entropía asociada con el proceso disipativo periférico, que proporciona la energía para todo cambio. Siempre debe darse esta recuperación o conversión de entropía en información, aunque la tasa de conversión varíe según el tipo de máquina y haya razones para creer en la existencia aquí de un sentido profundo de la evolución.

Ello nos lleva a profundizar en el significado de la selección natural biológica. Ofrece la oportunidad de maximizar la recuperación de entropía en términos de información. Lo que se manifestaría tanto en la sucesión ecológica como en la secuencia de generaciones en una especie. Puesto que la evolución se da, las especies no pueden existir sin evolucionar. Me atrevería a añadir que, si la sucesión existe —y ello parece fuera de toda duda—, los ecosistemas tampoco pueden permanecer a la vez activos y de composición constante. Las sucesiones en el plancton pueden representarse por aceleraciones o deceleraciones, gobernadas por un sistema disipativo externo y un sistema de covariancias que expresa el grado de autoorganización interna del sistema.

La manifestación de secuencias sucesionales o de desarrollo es como una *vis a tergo* que mueve a los sistemas según direcciones que no se pueden recorrer en sentido inverso: el crecimiento individual acaba con la muerte, pero no con un decrecer, y la sucesión ecológica suele rematarse por alguna catástrofe —fuego, clima, etc.— pero raramente por una reorganización o desorganización gradual. Por supuesto, la alternancia entre la modificación gradual y la relativa brusquedad de cambios irreversibles no es exclusiva de los sistemas que llamamos vivos, como prueban la dinámica de fluidos y, a una escala más lenta, la historia de la corteza terrestre. La combinación de transmisión de información, autoorganización, copia y selección natural asimila constructivamente la muerte.

Descendiendo al nivel o escala mínima de los acontecimientos, uno se siente tentado a buscar inspiración en las especulaciones de los físicos, aunque siempre se puede dudar de si las analogías son válidas o simplemente son impuestas por la manera de funcionar de nuestro cerebro, que sin duda evolucionó más como órgano de supervivencia que para resolver los enigmas que nos planteamos. A un científico de especialidad ajena le llama la atención e intenta comprender la insistencia de los físicos en los problemas de la indeterminación. Se formulan en relación con un proceso energético —un fotón que circula— y su manifestación en un momento posterior —el fotón manifiesta su presencia o su paso en un lugar o en otro. El quid del asunto parece estar en que no se puede afirmar dónde ha ido a parar hasta que un observador adecuado levanta acta.

Una de las ilustraciones divulgadoras de este conflicto se expresa por el experimento imaginario del gato de Schrödinger, que no se puede decir vivo o muerto (o 50 % vivo y 50 % muerto) hasta que no se ha abierto una caja dentro de la cual se hallan, próximos, un sistema disipativo (una fuente de partículas y un amplificador mecánico asesino) y un sistema que a todos los efectos prácticos funciona como perceptor de la información: el gato, vivo o muerto. Las consideraciones a que da lugar se pueden desarrollar hasta llegar a postular una base consciente de la teoría de la medición. El punto clave es que se sabe que se ha producido cierto efecto, pues el sistema disipativo ha funcionado, pero el resultado no se conoce y, por tanto, no se puede tratar como información adquirida. Los físicos estiman que no se puede hablar de información hasta que algún observador haya levantado acta. Sólo entonces sabremos si el gato está vivo o muerto. Un aumento de entropía en el sistema disipativo puede reflejarse en algún cambio en el sistema autoorganizativo; pero, ¿cuál es la condición para que se considere como un aumento de información? ¿Qué grado de percepción, conciencia o funcionalidad se requiere?

La opinión de los físicos indeterministas es que nunca se puede dar por segura la conversión de un acontecimiento energético (disipación de energía) en información, si no hay un observador o no se vislumbra alguna propiedad reconocible en el futuro del sistema que experimenta el cambio. Esta visión moderadamente indeterminista resulta compatible con lo que sabemos de la vida y también con las posibilidades asociables a un mundo abierto, del que todavía se pueden esperar muchas cosas. No sería el menor beneficio el de contribuir a mover algo los programas y las perspectivas de la ecología actual, que de momento parecen oscilar entre lo lúgubre y lo comercial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTION OF DISSIPATIVE SYSTEM: A THEORETICAL BASIS OF MARGALEF'S PRINCIPLE ON ECOSYSTEM. K. Matsuno en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 70; págs. 23-31; 1978.

TEORÍA DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS. R. Margalef. Publicac. de la Universidad de Barcelona; 1991.

ORGANISMS AS ECOSYSTEM ENGINEERS. C. G. Jones, J. H. Lawton y M. Shachak en *Oikos*, vol. 69; págs. 376-386; 1994.

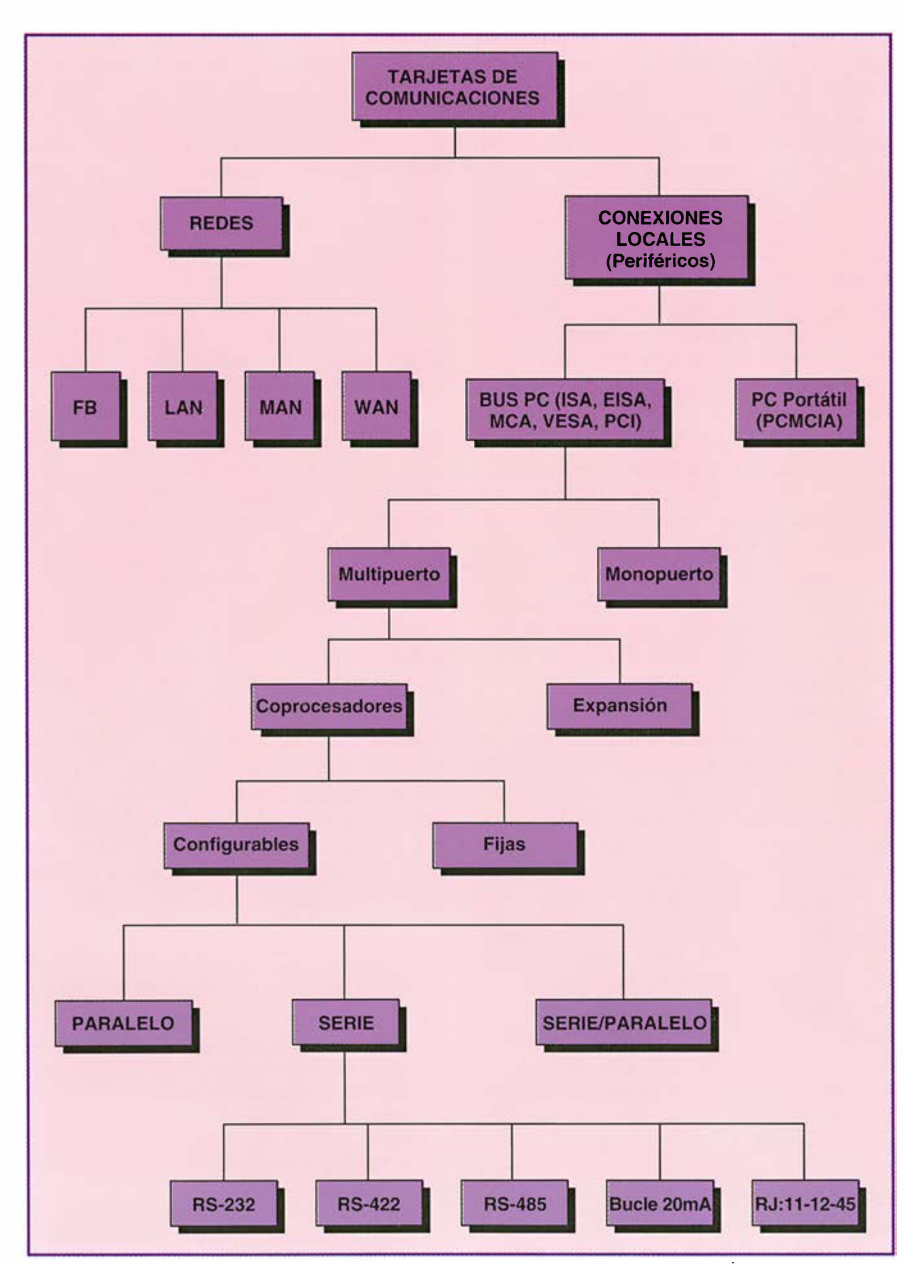
Ciencia y empresa

Tarjetas multipuerto

Aplicaciones y características

El avance experimentado en el desarrollo de la microelectrónica ha posibilitado la aparición de tarjetas con circuitos integrados ("chips") que satisfacen una gran variedad de aplicaciones en todos los sectores de la actividad empresarial y social. En el ámbito de las comunicaciones, la creciente necesidad de interconectar máquinas, ordenadores, terminales y usuarios, cualquiera que sea su situación geográfica y movilidad, justifica la amplia oferta de tarjetas destinadas a la configuración de redes de larga distancia (WAN, de "Wide Area Network") que abarcan continentes y países, de área metropolitana (MAN, de "Metropolitan Area Network") en ciudades, de área local (LAN, de "Local Area Network") que enlazan uno o varios edificios o una planta industrial (bus de campo, o "Field Bus").

El elemento básico de interconexión y acceso a estas redes es el computador personal (PC, de "Personal Computer"). A éste se le añaden unas conexiones locales, o "puertos", para a su vez incorporar a las redes mencionadas otros equipos próximos auxiliares o complementarios del PC, que en el entorno de oficinas se denominan periféricos (impresoras, discos ópticos, escáneres, trazadores, pantallas, módems, lectores de código de barras, etc.), y en las plantas de fabricación pueden ser: máquinas de control numérico (CNC, de "Computer Numeric Control"), robots, manipuladores, autómatas industriales (PLC, de "Programmable Logic Controlers"), reguladores, terminales de adquisición de datos, equipamiento de laboratorio, sistemas de control de calidad y otros.



Clasificación de las tarjetas de comunicaciones según el ámbito de aplicación

Las tarjetas de comunicaciones destinadas a las conexiones locales de los PC utilizan las señales de datos, direcciones y control que configuran el bus principal del computador, para comunicarse con la unidad central de proceso (CPU, de "Central Processing Unit") del ordenador. Los buses principales típicos de PC se caracterizan por el número de señales de datos (bits) que pueden manejar simultáneamente, y son: ISA (8-16 bits), EISA (32 bits) y MICROCHANNEL (32 bits). Otros buses de PC denominados "locales" para tarjetas especiales y con altas velocidades de transferencia de información son: VL ("Vesa Local-Bus") y PCI ("Peripheral Component Interconnect"), ambos de 32 bits.

La dificultad de incorporar directamente las tarjetas del mercado a los PC portátiles, debido a su pequeño tamaño, motivó la aparición del bus PCMCIA ("Personal Computer Memory Card International Asociation"), que admite la conexión directa de tarjetas cuyas dimensiones son las de una tarjeta de crédito, esto es, de 54 milímetros de ancho por 85,6 milímetros de largo.

Dado que el PC constituye una plataforma para muy diversas aplicaciones, suele presentar un número limitado de conexiones locales o "puertos" —normalmente dos "serie" y uno "paralelo" para una impresora—, con el fin de ofrecer la máxima flexibilidad al usuario, pertenezca éste al sector ofimático, industrial o privado. Surge de esta forma la necesidad de ampliar el número de puertos, más allá de los proporciona-

dos directamente por el PC, para aplicaciones concretas.

La ampliación del número de puertos puede hacerse mediante una tarjeta que, conectada al bus del PC, proporcione uno (monopuerto) o varios puertos (multipuerto). Las tarjetas monopuerto se utilizan en los casos en que las conexiones locales son pocas o requieren una adaptación especial; por ejemplo, en el aislamiento galvánico mediante optoaisladores. A diferencia de las monopuerto, las tarjetas multipuerto tienen varias conexiones locales (de dos a 32) en un solo módulo. Si las comunicaciones de los puertos se controlan por uno o varios procesadores incorporados a la tarjeta, se denominan tarjetas coprocesadoras; si el control lo lleva directamente la unidad central de proceso del PC, tarjetas de expansión.

Comparadas con las de expansión, las tarjetas multipuerto coprocesadoras permiten una mayor velocidad de transferencia en los puertos, lo que les confiere particular interés en aplicaciones de tiempo real. Asimismo, liberan al PC de ejecutar las tareas de comunicación, y éste dispone de más tiempo para dedicarse a otras aplicaciones del usuario. La incorporación del procesador o procesadores a la tarjeta multipuerto encarece su coste.

Como ya se ha mencionado, existe una gran variedad de equipos periféricos o de control industrial conectables a los diversos puertos de la tarjeta, que a su vez presentan conexiones con distintas especificaciones eléctricas (señales), mecánicas (conectores) y funcionales (procedimientos de comunicación). Según que las tarjetas multipuerto coprocesadoras permitan o no reconfigurar las conexiones de cada puerto para distintas especificaciones, se clasifican en configurables o fijas. Estas conexiones con diferentes especificaciones para cada puerto pueden presentar la información en serie, en paralelo o en una mezcla de ambos, según que la información se transmita por una única línea (dos cables) o por varias líneas simultáneamente (ocho cables).

Las características generales de las tarjetas multipuerto coprocesadoras configurables pueden resumirse en las siguientes:

—tipo de microprocesador incorporado: 8, 16 y 32 bits;

—número de puertos: 2, 4, 8, 16 y 32;

—tipo de puertos: serie, paralelo y serie/paralelo;

—normas de conexión de los puertos: RS-232, RS-422, RS-485, bucle de corriente de 20 miliampères, RJ-11, RJ-12, RJ-45 y Centronics;

—conexiones a los puertos: directas con conectores en la propia tarjeta o mediante cables externos y módulos independientes con cajas de conectores;

—limitaciones del PC en cuanto al número de tarjetas similares conectables debidas al sistema operativo, número de ranuras ("slots") en el bus del PC, número de interrupciones disponibles y potencia de la fuente de alimentación;

—tipo de bus que admite la tarjeta: ISA, EISA y MICROCHANNEL (MCA);

—facilidades de configuración y monitorización de la tarjeta (memoria PROM): direccionamiento, inicialización, rutinas de servicio, diagnóstico y otros.

—utilidades que ofrece la tarjeta (programas) para el desarrollo de aplicaciones: controladores de los puertos ("drivers"), facilidades de presentación gráfica, sistema operativo para tiempo real, etcétera.

Las especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales de los puertos "serie" y "paralelo" de las tarjetas de comunicaciones multipuerto cumplen normas internacionales, con objeto de adaptarse al tipo de conexiones que presentan los equipos periféricos de ordenadores en entornos ofimáticos, o los terminales mencionados para las plantas de fabricación. Por su mayor presencia en las tarjetas multipuerto se detallan las normas "serie". Entre las conexiones "paralelo" se suele emplear la especificación Centronics (8 bits) para impresoras, con conectores de 40 y 36 patillas.

La conexión RS-232 permite conexiones punto a punto con conectores normalizados DB-25 (25 patillas), y se utiliza para comunicaciones "serie" asíncronas de bajo coste a distancias cortas (15 metros) y bajas velocidades (20 kilobits por segundo). En aplicaciones que necesitan eliminar las interferencias eléctricas de los cables (ruido), la norma RS-422 permite mayores distancias en comunicaciones punto a punto (1200 m) con altas velocidades (300 kbps) y conectores DB-37 (37 patillas) y DB-9 (9 patillas).

La norma RS-485 es una conexión a dos hilos que permite conectar hasta 32 equipos terminales (multipunto), formando un bus de alta velocidad (300 kbps) con distancias grandes (1200 m). Esta conexión suele utilizarse para realizar redes de bajo coste a dos hilos (bus de campo).

A diferencia de las conexiones "serie" anteriores, la conexión en bucle de corriente de 20 miliampères utiliza señales de corriente (miliampères) en vez de señales de tensión (volts). Es una conexión muy económica con un número limitado de hilos —cuatro por lo común—, para comunicaciones punto a punto (450 m) y baja velocidad (9,6 kbps).

La presencia generalizada de los conectores telefónicos (roseta) en los equipos de ordenadores ha llevado a la presentación de las señales de la norma RS-232 (conector DB-25) en conectores telefónicos macho denominados: RJ-11 (4 hilos), RJ-12 (6 hilos) y RJ-45 (8-10 hilos).

PERFECTO MARIÑO ESPIÑEIRA
FRANCISCO POZA GONZÁLEZ
JUAN BENIGNO NOGUEIRA NINE
Dpto. de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo y División de Comunicaciones Digitales del Instituto de Electrónica Aplicada

Desarrollo de productos cárnicos

Con reducido contenido en grasa

Cada vez se conoce mejor la relación existente entre dieta y salud. Los hábitos alimentarios van modificándose en el sentido de una atención progresiva, por parte del consumidor, a la elección de los alimentos. En los países industrializados, crece con rapidez el consumo de productos percibidos como más saludables, en los que la presencia de determinados compuestos, como grasa, sal, cafeína, colesterol y otros, se encuentre limitada. Influyen, además, las razones estéticas y la decreciente necesidad de ingerir alimentos energéticos en un sistema de vida sedentario.

La industria alimentaria, muy competitiva, ha de mostrarse receptiva a las demandas del consumidor. De todos los sectores, el cárnico ha sido el que ha sufrido más los efectos adversos de una publicidad sesgada sobre las implicaciones de la carne y sus derivados en el desarrollo de ciertas enfermedades. En el caso de la grasa se ha insistido en su implicación en patologías coronarias (arteriosclerosis, trombosis, etc.), obesidad, hipertensión, cáncer y otros. Esta situación ha instado el desarrollo de técnicas encaminadas a la obtención de productos con un contenido menor en lípidos y un nuevo perfil de los componentes de la grasa presente.

Los productos cárnicos más adecuados para la reformulación son los que presentan cierta desintegración estructural y elevado contenido en grasa. Pero la reducción del contenido en grasa no es una tarea fácil que pueda

TIPOS DE PRODUCTOS	PORCENTAJE HABITUAL	PORCENTAJE MINIMO
Elaborados a partir de carnes picadas	20 - 25	5 - 10
Emulsiones	20 - 40	10 - 12
Embutidos madurados	30 - 50	20 - 30
Productos untables	35 - 45	20 - 25

Porcentajes habituales de grasas y niveles inferiores alcanzables en diversos tipos de productos cárnicos

llevarse a cabo empleando simplemente menos en la elaboración. La grasa condiciona el color, el gusto, aroma y textura, así como otros factores asociados al procesado de los productos. Reducir el nivel de grasa implica modificar la composición y naturaleza del producto. La variación de otros componentes (agua, proteína, ingredientes) lleva aparejada la existencia también de ciertos cambios en sus propiedades.

La elaboración de productos con reducido nivel de grasa responde a dos criterios básicos: la utilización de materias primas cárnicas más magras (lo que encarece el costo de la formulación) y la disminución de la densidad de grasa y calorías mediante la adición de agua y otros ingredientes con escasa o nula aportación de calorías. Esto, además, se puede complementar con procedimientos que coadyuven a compensar los efectos no deseados que originan las modificaciones que se inducen al variar la composición y naturaleza del producto. A medida que disminuye el porcentaje de grasa y aumenta el de agua, la capacidad de retención de agua del producto va desplazando a la capacidad de ligar grasa como factor esencial a tener en cuenta durante su elaboración.

Para el desarrollo de los nuevos productos hemos de seguir, individual o conjuntamente, diversos procedimientos basados en estos criterios: selección de ingredientes cárnicos, utilización de ingredientes no cárnicos y adecuación de las técnicas empleadas. La selección de ingredientes cárnicos puede abordarse mediante métodos físicos y químicos que reduzcan el nivel de grasa de la carne empleada como materia prima, así como a través de modificaciones genéticas que condicionen la grasa presente en los animales de abasto. En cuanto a la funcionalidad proteica, influyen el empleo de carne en prerrigor, la manipulación física de la misma, la fuerza iónica del medio, aplicación de altas presiones y otros.

Deben utilizarse ingredientes no cárnicos que confieran las características texturales idóneas; en especial, la capacidad de retención de agua. Abarcan estos compuestos el agua añadida, proteínas de origen no cárnico (soja, surimi, proteínas de origen lácteo, gluten, albúminas), carbohidratos (gomas o hidrocoloides, almidones y maltodextrinas y derivados de la celulosa) y otros productos (mezclas funcionales, aceites vegetales y productos sintéticos).

El tercer grupo de procedimientos disponibles para determinar las características de los productos cárnicos se funda en la adecuación de las técnicas de elaboración y preparación. Nos referimos, por ejemplo, a las condiciones de picado y las relativas al proceso de emulsificación, los tratamientos térmicos y el control de las propiedades gelificantes, entre otras. De igual modo, en la fase de preparación culinaria de algunos productos, así las hamburguesas, pueden existir modificaciones cuantitativas importantes en relación con la presencia final de grasa, colesterol y calorías.

FRANCISCO JIMÉNEZ COLMENERO
Instituto del Frío (CSIC). Madrid

Visión artificial

Arquitecturas de circuitos

Resulta familiar ver en televisión, incluso en programas informativos, efectos visuales de todo tipo: imágenes que rotan para pasar de una escena a otra, paneles que aparecen y desaparecen para ilustrar el pronóstico del tiempo, etcétera. Detrás de eso hay un conjunto de técnicas para digitalizar las imágenes de vídeo y, a continuación, modificarlas y combinarlas a través de circuitos específicos o de computadores de propósito general.

El tratamiento de imágenes sólo pretende transformarlas. Constituye el primer paso de la visión artificial. Pero ésta se propone avanzar más. Los circuitos o computadores que reciban la imagen no sólo la transformarán, sino que extraerán de ella alguna información decisiva para provocar, a través de señales eléctricas, que un dispositivo operador actúe o no, y en qué medida lo haga. Por ejemplo, el computador puede accionar unas pinzas de robot para que se cierren o abran, y así extraer una pieza de una cadena de producción en la que se ha *visto* un defecto de fabricación.

El proceso de transformación y análisis de imágenes es completamente determinista (incluso con técnicas adaptativas), pero el efecto justifica la expresión "visión artificial" (como el de inteligencia artificial y otros análogos): las máquinas, que no tienen conciencia en absoluto de ver nada, parece como si vieran, pues sacan, mueven, dejan, orientan, etcétera.

¿Qué arquitectura tiene un circuito para poder realizar la función mencionada? La respuesta encierra dos niveles, que se corresponden con los dos tipos de tareas necesarias: el tratamiento de imágenes y la visión artificial. Con el tratamiento de imágenes sólo se busca modificar la imagen de partida por superposición, realce de contornos, rotaciones, cambios de color, etcétera. Con la visión artificial se analiza el entorno para tomar decisiones. La visión artificial precisa, como punto de arranque, el tratamiento de imágenes, pero va mucho más lejos.

En cuanto a las arquitecturas para el tratamiento de imágenes, existen tres enfoques. Los tres superan el procesador solitario que opere por programación. La primera arquitectura es la de *red de procesadores* ("array processor"); en forma de matriz, distribuye el tratamiento de la imagen asignando a cada procesador la zona de imagen que por su localización le corresponda. Reduce notablemente el tiempo de procesamiento, ya que todos los procesadores trabajan a la vez; sin embargo, sólo resulta útil para tratamientos que están relacionados con la estructura bidimensional de la imagen (y por tanto pueden sacar provecho de la estructura bidimensional de la red de procesadores).

La segunda arquitectura es el *multiprocesamiento.* Aquí, dos o más procesadores de propósito general trabajan a la vez, aunque realizan tareas distintas para alcanzar antes, entre todos, el tratamiento deseado. Se trata de una aplicación, a la visión artificial, de un procedimiento de uso general destinado a aumentar la velocidad de computación.

La tercera arquitectura es el *encadenamiento de circuitos* ("pipe-line"),

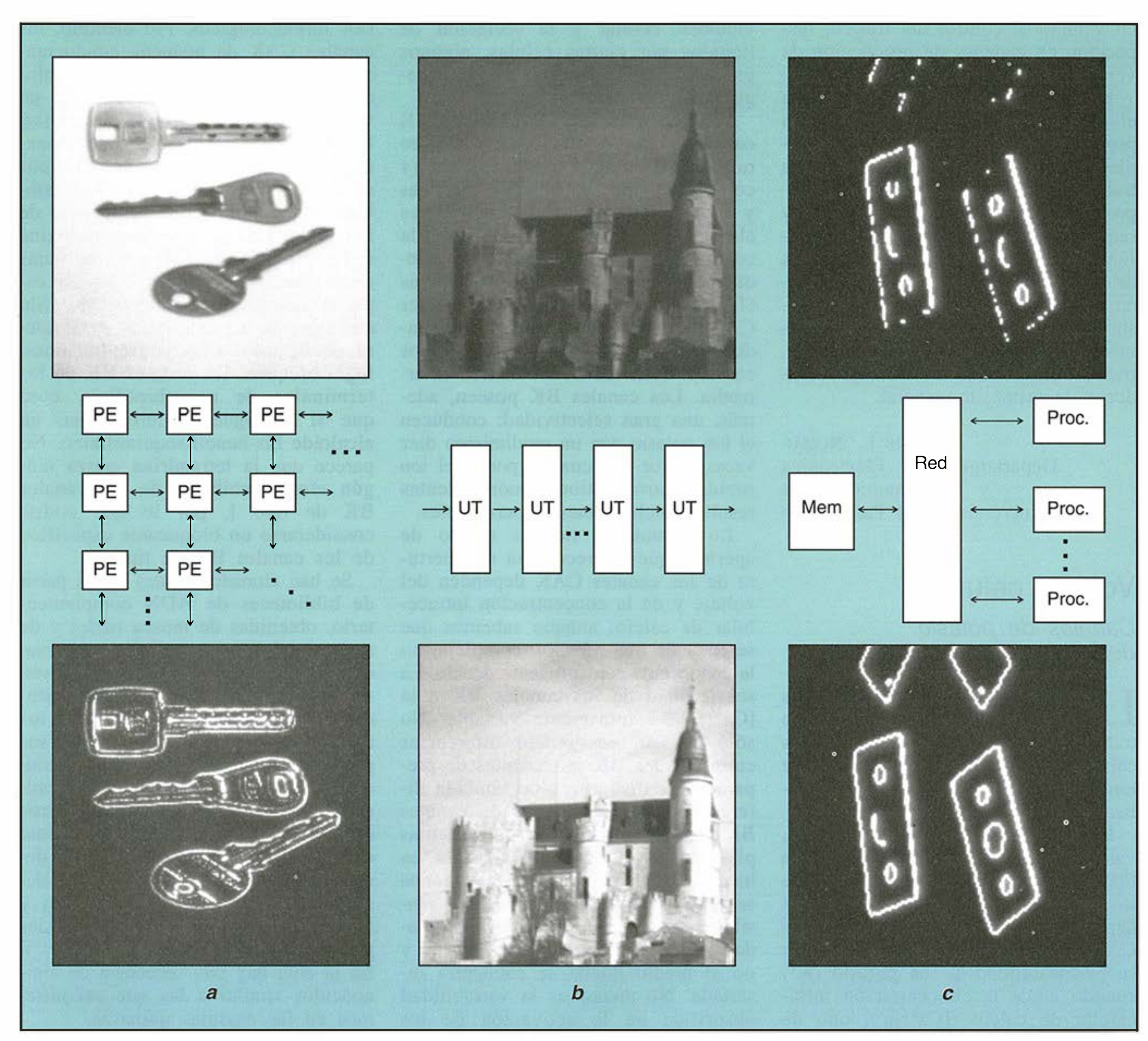
específicamente diseñados para realizar una tarea concreta sobre una imagen cuando todos los puntos de ésta pasen consecutivamente a través de los circuitos.

En cuanto a las arquitecturas para visión artificial, se requiere que éstas, además del tratamiento inicial de imágenes, realicen tareas de análisis y generación automática de decisiones, a partir de la información sistemáticamente extraída en un proceso previo de tratamiento. Las posibilidades algorítmicas de acometer dicho análisis son tantas, tan variadas y tan ligadas a la aplicación de la máquina de visión, que se hace necesario recurrir a procesadores de propósito general, convenientemente programados para realizar el algoritmo deseado. Aquí se encuadra el reconocimiento de formas, el análisis tridimensional del entorno, análisis de texturas y un largo etcétera.

La necesidad de recurrir en este segundo paso a un procesador de propósito general conduce, con frecuencia, a que también el primer paso del tratamiento de imágenes inicial lo dé el mismo procesador, sin tener que apoyarse en las arquitecturas especiales antes mencionadas, que son costosas y con ámbito de aplicación restringido. Esta solución se ve favorecida por el rápido aumento de velocidad en los microprocesadores.

Debemos mencionar las *redes neuronales*, un planteamiento alternativo que se está aplicando con algún éxito en el reconocimiento de caracteres y otras tareas de visión análogas. El nombre se corresponde con una estructura que trata de emular la forma de comunicación entre las neuronas. Si bien se establece un modelo que imite la comunicación entre células nerviosas, la realización práctica se hace normalmente por programación ("software") en un procesador de propósito general.

Hay un campo donde no basta la



Arquitecturas especiales para el tratamiento de imágenes. En el procesador de red (a), *cada píxel o grupo de píxeles está asignado a un procesador elemental (PE) en función de su localización. Apto para algoritmos de vecindad, como la extracción de contornos en la figura. En el encadenamiento de circuitos* (b), *cada píxel pasa, en secuencia, por toda la cadena de unidades de transformación (UT). Es la arquitectura adecuada para transformaciones puntuales o de vecindad pequeña. En el multiprocesamiento* (c), *la tarea se distribuye de forma arbitraria entre dos o más procesadores de la máquina. Conveniente en algoritmos que involucran grandes regiones de imagen*

programación en un microprocesador: las imágenes en movimiento involucran tal cantidad de información para los primeros pasos del tratamiento, y en tan poco tiempo, que reclaman la existencia de una arquitectura especial, el encadenamiento de circuitos. Esta arquitectura se está convirtiendo en la más usada por circuitos comerciales de visión; por otro lado, cada uno de los circuitos de la cadena realiza una tarea determinada, y resultan así diseños electrónicos asequibles. El mencionado ámbito de aplicación sobre imágenes en movimiento se presenta en numerosos problemas reales: efectos especiales en la edición de vídeos, visión artificial en robots móviles, autoguiado en vehículos, control del tráfico, inspección en cadenas de producción de velocidad elevada y otros.

En definitiva, las perspectivas en el campo de la visión artificial son prometedoras en dos vertientes complementarias. En primer lugar, los tratamientos que involucren al tiempo desde el procesamiento inicial y requieran diseños electrónicos específicos, probablemente con estructura de encadenamiento de circuitos; y, en segundo lugar, técnicas de análisis posteriores que exigirán algorítmica depurada y su implantación, por programación, en microprocesadores de propósito general.

LUIS L. NOZAL
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad del País Vasco

Voltaje celular

Canales de potasio dependientes de ion calcio

Los canales iónicos son proteínas que se extienden a través de todo el espesor de las membranas celulares y permiten el tránsito de iones a través de un "poro" de localización central.

Los canales iónicos son selectivos; vale decir, la permeabilidad de cada tipo de canal difiere según el ion que lo transite. Los canales de potasio dependientes de ion calcio (canales CAK) se caracterizan por aumentar su permeabilidad al ion potasio (K^+) cuando crece la concentración intracelular de calcio ($[Ca^{++}]_{IC}$), uno de los principales mensajeros intracelulares. Los canales CAK establecen una vinculación directa entre el metabolismo de la célula y el potencial de la membrana: un aumento en la concentración intracelular de calcio desencadena, al activar los canales CAK, un flujo de K^+ desde el citoplasma hacia el exterior de la célula, con la consecuente hiperpolarización (o repolarización, si existía una despolarización previa) de la membrana.

La presencia de canales CAK se ha demostrado en un vastísimo número de preparaciones y sistemas. Aunque no se acaba de conocer la función de esas proteínas en algunos tipos celulares, existen pruebas sólidas de que los canales CAK contribuyen a controlar el potencial de reposo de las células, la excitabilidad y disparo de descargas por las neuronas, la actividad temporizadora ("pacemaker") de las células autoexcitables, las hiperpolarizaciones transitorias, el volumen celular y la secreción de líquidos por ciertas células, algunos procesos de neurosecreción y la regulación del tono arteriolar.

Podemos clasificar los canales CAK en varios grupos funcionales. Así, en razón de la conductancia unitaria (y corroborado por diferencias cinéticas y farmacológicas) se distinguen tres clases: los canales CAK de elevada conductancia ("canales BK"), con conductancia mayor de 150 picosiemens ($1\ pS = 10^{-12}$ siemens); los canales CAK de baja conductancia, con conductancia menor de 50 pS, y los canales CAK de conductancia intermedia. Los canales BK poseen, además, una gran selectividad: conducen el ion potasio con un rendimiento diez veces mayor que cuando portan el ion rubidio; otros cationes monovalentes resultan incluso menos permeables.

Lo mismo el tiempo medio de apertura que la frecuencia de apertura de los canales CAK dependen del voltaje y de la concentración intracelular de calcio; aunque sabemos que se trata de una relación compleja, no la conocemos con suficiente detalle. La sensibilidad de los canales BK a la $[Ca^{++}]_{IC}$ es sumamente variable. No sólo se han encontrado diferencias entre canales BK procedentes de preparaciones distintas, sino también diferencias entre dos tipos de canales BK cuando se incorporaron vesículas plasmáticas de encéfalo de rata en bicapas lipídicas. De estos resultados se puede inferir que la diferente sensibilidad al Ca^{++} se debería a propiedades de la proteína canal en sí, y no al medio donde se encuentra insertada. No menor es la variabilidad observada en la activación de los canales BK por despolarización; existen incluso canales que son insensibles al voltaje.

Pese a semejante variabilidad, se han identificado dos tipos de canales BK, en razón de su diferente sensibilidad a la $[Ca^{++}]_{IC}$ y de sus propiedades cinéticas (es decir, diferencias en la duración media y en el número de los posibles estados a través de los cuales oscila el canal). El tipo I se caracteriza por transiciones más rápidas entre los diversos estados posibles, mientras que el tipo II, una vez abierto, permanece así por más tiempo (muestra un tiempo medio de apertura mayor). El canal de tipo II es mucho menos sensible a la concentración intracelular de calcio que el tipo I. Los canales BK de la neurohipófisis de rata, canales que nuestro grupo estudia, presentan características cercanas a las del tipo II.

Los canales CAK pueden clasificarse, asimismo, de acuerdo con criterios farmacológicos. Por ejemplo, los canales CAK de pequeña conductancia, insensibles al voltaje, los bloquea específicamente la apamina, un veneno peptídico extraído de abejas. El tetraetilamonio (TEA), aplicado extracelularmente, bloquea ambos tipos de canales BK, que se inactivan también con la aplicación intracelular de ion bario. Los péptidos carabditoxina e iberiotoxina, aplicados a muy bajas concentraciones, pueden bloquear específicamente los canales BK. Sin embargo, la carabditoxina, ni siquiera empleada a altas concentraciones, logra bloquear los canales BK de los terminales de neurohipófisis, cosa que sí consigue la tetrandrina, un alcaloide bis-bencilisoquinolínico. No parece que la tetrandrina ejerza ningún efecto inhibidor de los canales BK de tipo I, por lo que podría considerarse un bloqueante específico de los canales BK de tipo II.

Se han clonado canales BK a partir de bibliotecas de ADN complementario, obtenidas de mosca (*dslo*) y de ratón (*mslo*); esos canales, expresados en ovocitos de *Xenopus laevis*, se han caracterizado mediante estudios electrofisiológicos. Aunque los canales *mslo* y *dslo* difieren por sus propiedades electrofisiológicas —conductancia unitaria, sensibilidad al voltaje, cinética y, en particular, sensibilidad al Ca^{++}—, poseen similitud estructural: comparten un dominio denominado núcleo ("core") y otro denominado cola ("tail"). El núcleo y la cola del canal se encuentran unidos por una región de conexión ("linker"). En la cola hay una secuencia de aminoácidos similar a las que encontramos en las enzimas quinasas.

Ambos clones, *dslo* y *mslo*, presentan numerosas variantes de conformación ("splice-variants"). Si superponemos las secuencias primarias y los perfiles de hidrofilicidad de *mslo* y *dslo*, observaremos que el

dominio núcleo posee seis posibles segmentos de transmembrana, simbolizados por la serie S1 a S6, una sucesión de cargas positivas regularmente dispuesta en S4, y una región altamente conservada entre S5 y S6 que define al poro del canal. Al examinar las propiedades electrofisiológicas de canales quiméricos, creados al inyectar combinaciones heterólogas de núcleo y cola, se ha demostrado recientemente que : 1) núcleo y cola son necesarios para que el canal funcione; 2) el núcleo determina la permeabilidad y la selectividad iónica (propiedades vinculadas a la región que corresponde al poro del canal); 3) la cola es la región involucrada en la sensibilidad al Ca^{++}.

Supongamos una neurona. ¿Se aloja cada tipo de canal BK en distinta localización, vinculada a su función? El canal BK presente en los terminales de neurohipófisis se parece al de tipo II, originalmente descrito en sinaptosomas de encéfalo de rata. El tipo II podría ser característico de los terminales nerviosos, mientras que el tipo I podría ser propio de los cuerpos neuronales. Esta hipotética "compartimentalización" podría correlacionarse con las diferencias funcionales halladas entre estos dos tipos de canales: el tipo II, situado cerca de los sitios de liberación del neurotransmisor, estaría expuesto a niveles de [Ca^{++}] mucho mayores (1-100 micromolar) que los habitualess en el resto de la neurona (0,1-1 micromolar). Es decir, los dos tipos de canales BK presentarían la dependencia a la concentración de calcio apropiada para su función particular: neurosecreción, en el caso del tipo II; control de la excitabilidad neuronal, en el tipo I.

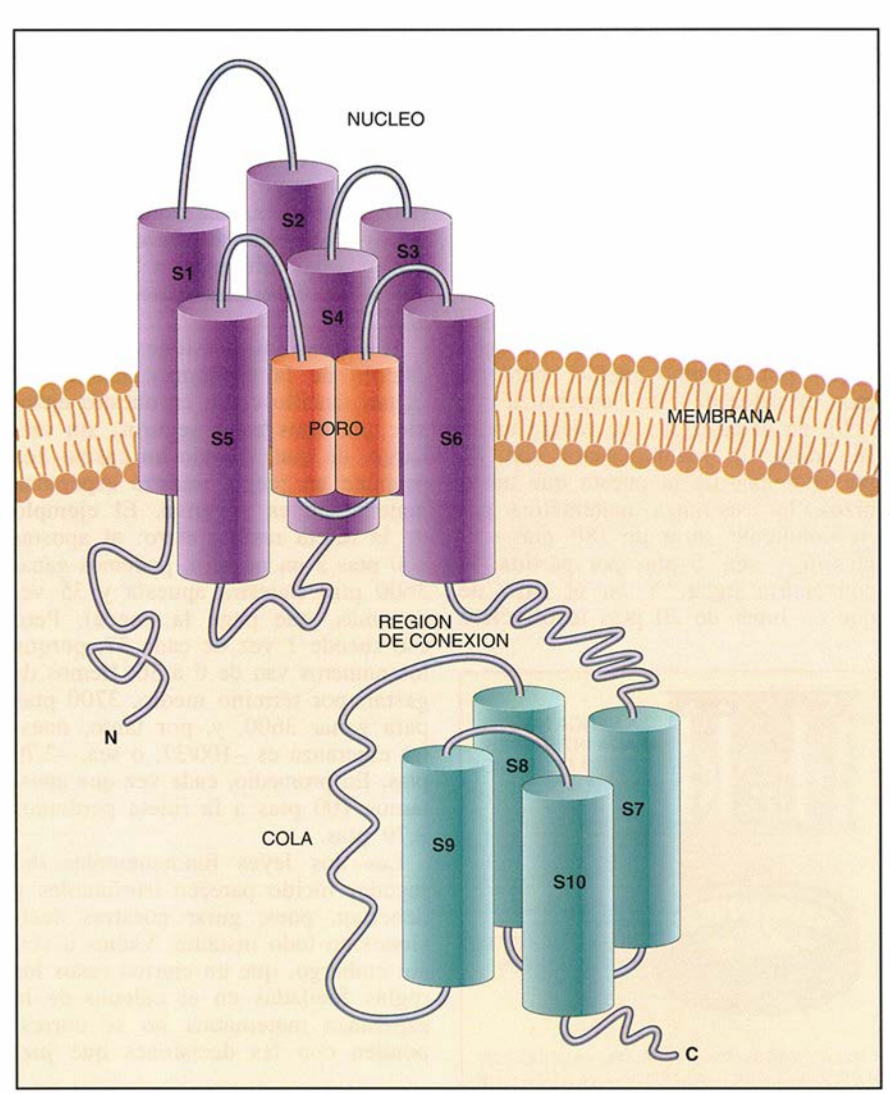
¿Cómo se regulan los canales BK? La exposición al adenosín trifosfato (ATP), en el lado citoplasmático de la membrana, intensifica la actividad de los canales BK de tipo II en los terminales de la neurohipófisis; de ello cabe inferir que existe una actividad de quinasa endógena que está asociada con la actividad del canal. La fosforilación por quinasa de proteína A modifica la actividad de los dos tipos de canales BK, aunque en sentido contrario, al alterar la sensibilidad al voltaje, a la concentración intracelular de calcio o a ambos a la vez. Pero si se aplica ATP al lado externo de la membrana, se observa un bloqueo de la corriente BK de los terminales. La inhibición de los canales BK de los terminales no cambia si agregamos un bloqueante general de quinasas; de lo que hemos de deducir que tal inhibición no viene mediada por quinasas. La aplicación extracelular de ATP no ejerce ningún efecto sobre el canal BK de tipo I.

En contraste con el ATP, el etanol sí excita los canales BK en los terminales de neurohipófisis. Observación que corrobora una vieja hipótesis sobre la acción depresora del etanol, hipótesis según la cual las corrientes CAK serían un blanco de la acción de esta droga; confirma, además, otras investigaciones realizadas en neuronas de *Helix*, neuronas temporizadoras de *Aplisia*, sinaptosomas de cerebro y neuronas CA1 de hipocampo de rata. Esta activación de los canales BK, junto con la inhibición que ejerce el etanol sobre los canales de Ca^{++} dependientes del voltaje, podría explicar la inhibición que ejerce el etanol sobre la liberación de vasopresina y oxitocina por los terminales de la neurohipófisis. A diferencia del ATP, el etanol no parece discriminar entre los dos tipos de canales BK, ya que activa los canales *mslo* y *dslo*.

Han aparecido canales BK en una amplísima diversidad de tipos celulares, asociados a muy diferentes procesos fisiológicos. La biología molecular comienza a desvelar su increíble polimorfismo estructural; la electrofisiología nos brinda su correlato funcional. Apenas estamos empezando a entender por qué los diversos subtipos de canales BK podrían desempeñar funciones especializadas, a tenor de su ubicación específica en una misma célula o en diferentes tipos celulares.

ALEJANDRO M. DOPICO
Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts

JOSÉ R. LEMOS
Fundación Worcester para Biología Experimental



Modelo de un canal de potasio dependiente de ion calcio (CAK). El núcleo se extiende a través de todo el espesor de una membrana. La parte superior corresponde al exterior celular y la inferior al interior de la célula. La cola es el término C. Con modificaciones, tomado de Peter Reinhardt de la Universidad de Duke

Creaciones informáticas

Jean-Paul Delahaye

Desesperante esperanza

Un amigo le propone el siguiente juego: Tú pones 10 ptas; a continuación, lanzas un dado. Si sacas el 6, te doy 30 ptas (tus 10 ptas de la puesta y 20 ptas más de mi bolsillo); en caso contrario, no te doy nada y me embolso tus 10 ptas.

¿Le conviene a usted jugar?

Está claro que no, pues, en promedio, en cada seis partidas habría ganado 30 ptas y perdido 60, lo que supone una pérdida media de 5 ptas por envite. En teoría de probabilidades se diría que tal jugador tiene en cada partida una esperanza matemática de –5 ptas. Esta esperanza matemática es igual a la suma de las ganancias (y de las pérdidas), multiplicadas cada una por la probabilidad de ganar (o de perder); en nuestro juego, esta esperanza matemática es igual a (20 ptas) × 1/6 + (–10 ptas) × 5/6 = –5 ptas. Cuando la esperanza matemática es negativa, no se debe jugar: por término medio, perderemos el valor de esta "esperanza".

Si, en el caso de que sacara un 6, su amigo le recompensara con 80 ptas (además de la puesta que usted hizo), la esperanza matemática correspondiente sería de (80 ptas – 50 ptas)/6, o sea, 5 ptas por partida; le convendría jugar. Y en el caso de que en lugar de 20 ptas le ofreciera 50 ptas, tendría usted esperanza matemática nula en cada partida. En tal caso se dice que el juego es "equitativo" o que está "matemáticamente equilibrado".

Las dos leyes fundamentales del jugador lúcido

La noción de esperanza matemática, a la que también podríamos dar el nombre de ganancia media esperada, resulta meridianamente clara. Parece natural y racional enunciar las dos leyes fundamentales del jugador lúcido:

Ley 1: Cuando te propongan un juego, si la esperanza es positiva, acepta el juego; si es negativa, rehúsalo; si es nula, haz como prefieras.

Ley 2: Cuando te ofrezcan dos juegos y estés obligado a jugar, opta por el de esperanza matemática más alta.

Son raras las ocasiones en que el cálculo de la esperanza matemática es tan sencillo como en nuestro ejemplo; podemos estar seguros, sin embargo, de que, cuando un casino nos propone un juego, nuestra esperanza matemática es negativa. El ejemplo de la ruleta resulta claro: al apostar 100 ptas a un número, podemos ganar 3600 ptas (nuestra apuesta y 35 veces más, que paga la banca). Pero eso sucede 1 vez de cada 37, porque los números van de 0 a 36. Hemos de gastar, por término medio, 3700 ptas para ganar 3600, y, por tanto, nuestra esperanza es –100/37, o sea, –2,70 ptas. En promedio, cada vez que apostamos 100 ptas a la ruleta perdemos 2,70 ptas.

Las dos leyes fundamentales del jugador lúcido parecen irrefutables y deberían, pues, guiar nuestras decisiones en todo instante. Vamos a ver, sin embargo, que en ciertos casos las reglas fundadas en el cálculo de la esperanza matemática no se corresponden con las decisiones que juzgamos convenientes, pudiendo incluso desembocar en absurdos.

En caso de inflación

El primer ejemplo me ha sido facilitado por Jacques Pitrat, investigador en inteligencia artificial de la Universidad de Ciencias de París, quien nos hace sospechar una dificultad. Cuando la inflación anual es superior a 1/37, o sea, al 2,7 por ciento, y no existe ningún medio seguro de conseguir una esperanza media de ganancia que proteja de la inflación a nuestro dinero (tal es el caso de todos los países donde la economía está en crisis), los casinos constituyen el método menos malo para proteger nuestra economía.

En efecto, resulta preferible ir cada año a apostar el dinero que hemos ahorrado durante los doce meses precedentes que confiárselo a un banco, porque al jugarlo en el casino no se pierde, por término medio, más que 1/37 de nuestro dinero, sea cual sea la duración del período en el que hemos estado economizando, mientras que, al depositarlo en un banco, cuanto más tiempo dure el depósito (lo que resulta inevitable para alcanzar una suma interesante) más dinero perdemos. Demos un ejemplo numérico.

Imaginemos que la inflación anual

1. *Jugar de acuerdo con la esperanza matemática*



2. *A veces puede ser prudente jugar a la ruleta*

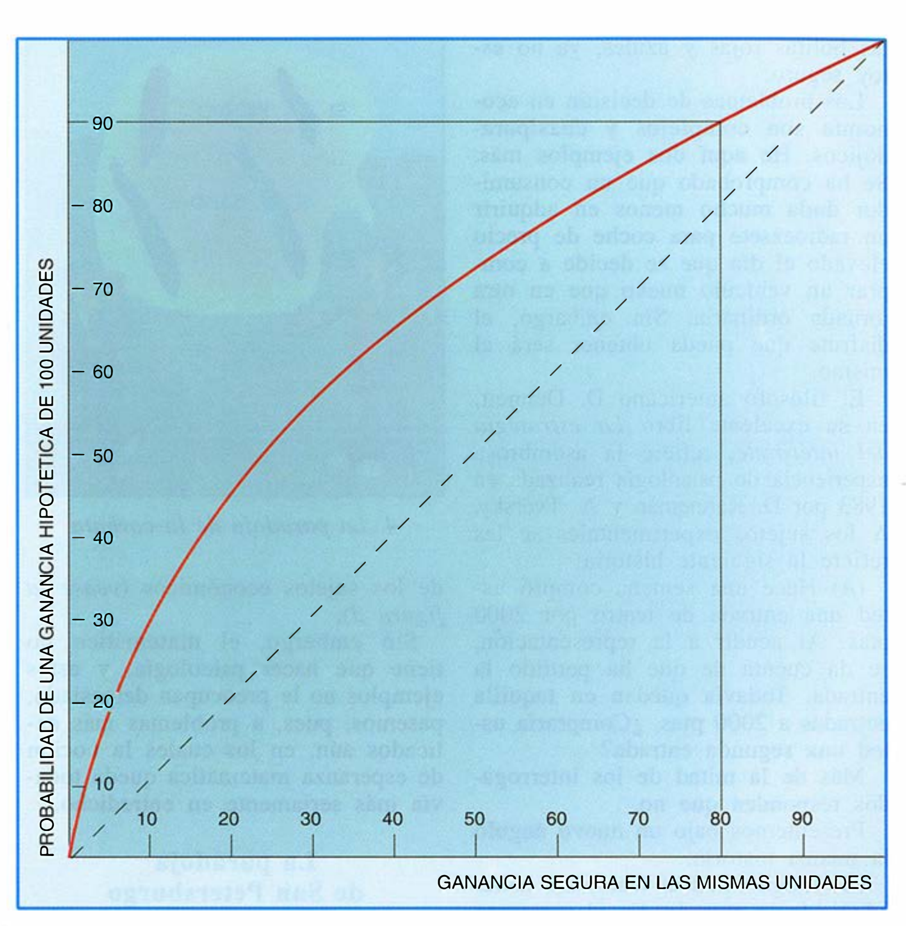
JEAN-PAUL DELAHAYE es profesor de informática en la Universidad de Lille.

sea del 10 por ciento y que el banco nos ofrezca un 5 por ciento de interés sobre el dinero que depositemos (interés que no compensa la inflación); durante diez años consecutivos, el 1 de enero de cada año ingresamos 1.000.000 ptas en el banco, con la intención de comprar una casa. Llegado el 31 de diciembre del décimo año retiramos de la entidad bancaria $1.000.000 \times (1{,}05 + 1{,}05^2 + 1{,}05^3 + ... + 1{,}05^{10})$, o sea, 13.206.787 ptas, cuyo poder adquisitivo (referido al año de partida) es igual a 13.206.787 ptas/$(1{,}10)^{10}$ = 5.091.788 ptas.

En cambio, si el 1 de enero de cada año nos jugamos el millón de pesetas a la ruleta y protegemos nuestras ganancias de la inflación (lo cual es posible, pues si ganamos podemos comprar al momento la casa de nuestros sueños), nuestra esperanza matemática de poder adquisitivo (referida siempre al año de partida) es igual a la suma de 3.600.000 ptas $\times 1/37 \times (1/1{,}1 + 1/(1{,}1)^2 + 1/(1{,}1)^3 + ... + 1/(1{,}1)^{10})$, o sea, 5.978.498 ptas, un resultado bastante mejor.

Este resultado nada tiene de asombroso, pues, de alguna forma, al jugarnos cada año nuestro millón de pesetas lo que estamos haciendo viene a ser confiar el dinero al casino, el cual, por 1/37 de tal importe, se ocupa del problema de la inflación hasta que haya de devolvernos el dinero.

A pesar de este cálculo irrefutable, no sé de nadie que haya recurrido al método del casino para proteger su dinero de la inflación. ¿Por qué? Sin duda, porque la incertidumbre sobre la fecha de reembolso resulta tan desagradable que preferimos perder más y no estar sometidos a los azares de los lanzamientos del croupier. En este caso, pues, la esperanza matemática no determina la conducta más racional.



3. Entre una ganancia segura y una ganancia hipotética se suele elegir la ganancia segura, aun siendo de menor importe. La curva, resultado de los trabajos de Kahneman y Tversky, indica en cuánto se estima subjetivamente una ganancia segura que se propone cambiar por una ganancia de 100 unidades con probabilidad de y por ciento. Así, una ganancia segura de 80 unidades corresponde subjetivamente a una ganancia de 100 unidades con probabilidad de 0,9

Rechazo de una ganancia media muy elevada

Existe un ejemplo más llamativo todavía de lo inadecuada que resulta la noción de esperanza matemática para determinar, en casos extremos, las preferencias de un individuo. Supongamos que nos proponen el juego siguiente: me das un millón de pesetas; a continuación sacas una bolita de esta urna, que contiene 1 bola roja y 99 bolas azules. Si extraes la bola roja, te doy mil millones de pesetas; de no ser así, no te doy nada.

Si aceptásemos semejante juego, ganaríamos mil millones una vez de cada 100, o sea 1000 millones por cada 100 invertidos, lo que supone un retorno de 10 millones por cada uno que arriesgamos. La esperanza matemática es, por tanto, de 9 millones por partida que se juega. La cosa parece sumamente interesante.

Plantéese ahora la cuestión con toda sinceridad (imaginando que dispone de un millón de pesetas, ahorradas una a una). ¿De verdad que jugaría? Estoy seguro de que, lo mismo que yo, va a contestar que no. La probabilidad de ganar parece demasiado pequeña, a pesar de que la ganancia que puede producirme mi billete es enorme y de que la esperanza sea netamente superior a la puesta.

Si uno es lo bastante rico como para poder jugar un gran número de veces a este juego (o si encuentra a alguien dispuesto a prestarle varios cientos de millones de pesetas), no deberíamos dudar; pero si sólo podemos jugar una o dos partidas, que nos cuestan muy caras, no estaremos dispuestos a correr el riesgo.

En las situaciones en que la apuesta se sitúa en los límites de nuestras posibilidades, parece razonable negarse a jugar, aun cuando la esperanza matemática sea muy favorable. Las reglas enunciadas anteriormente al respecto de la esperanza matemática no se corresponden con la realidad psicológica; la esperanza matemática no proporciona siempre un criterio de decisión racional, y resulta preciso revisar las dos leyes básicas del jugador lúcido.

¿Deberemos deducir del ejemplo de la bolita roja que en el caso de apuestas muy pequeñas resulte racional jugar, aunque la esperanza matemática sea negativa —situación contraria a la considerada hace un momento? Si tal es el caso, resultará fácil comprender el éxito de juegos propuestos por organismos públicos como la Lotería Primitiva, que con frecuencia distribuyen sólo el 55 por ciento de las sumas aportadas por los jugadores (los juegos propuestos tienen todos esperanza matemática negativa). Durante mucho tiempo me pareció absurdo participar en tales juegos; en la actualidad, a causa del ejemplo de

las bolitas rojas y azules, ya no estoy seguro.

Los problemas de decisión en economía son complejos y cuasiparadójicos. He aquí dos ejemplos más. Se ha comprobado que un consumidor duda mucho menos en adquirir un radiocasete para coche de precio elevado el día que se decide a comprar un vehículo nuevo que en otra jornada ordinaria. Sin embargo, el disfrute que pueda obtener será el mismo.

El filósofo americano D. Dennett, en su excelente libro *La estrategia del intérprete*, refiere la asombrosa experiencia de psicología realizada en 1983 por D. Kahneman y A. Tversky. A los sujetos experimentales se les refiere la siguiente historia:

(*A*) Hace una semana compró usted una entrada de teatro por 2000 ptas. Al acudir a la representación, se da cuenta de que ha perdido la entrada. Todavía quedan en taquilla entradas a 2000 ptas. ¿Compraría usted una segunda entrada?

Más de la mitad de los interrogados responden que no.

Presentemos bajo un nuevo ángulo la misma historia:

(*B*) Llega usted al teatro sin haber adquirido la entrada. En el momento de ponerse a hacer cola ante la ventanilla se da cuenta de que ha perdido uno de los billetes de 2000 ptas que esta mañana tenía en la cartera. Le queda lo justo para comprar una entrada. ¿Lo haría usted?

La historia (*B*) es "financieramente equivalente" a la historia (*A*); sin embargo, sólo el 12 por ciento de las personas consultadas indican que dejarían de comprar la entrada de teatro.

El matemático Daniel Bernoulli, que en el siglo XVIII había descubierto situaciones análogas, proponía reemplazar el criterio objetivo dado por la esperanza matemática (que en nuestros ejemplos hemos medido en pesetas) por un criterio de esperanza de utilidad subjetiva, medidos por el placer o el dolor consecuentes a un resultado. Al no ser la utilidad subjetiva función lineal del resultado en dinero, una ganancia de 10 millones no es 10 veces preferible a otra de 1 millón, y no proporciona, en satisfacción, el equivalente de la pena que se experimentaría al perder un millón economizado durante muchos años de trabajo. Estudios basados en experiencias similares a las de las entradas de teatro permiten hacerse una idea precisa de las relaciones entre el valor objetivo y la utilidad subjetiva, y dan igualmente elementos para comprender las decisiones



4. La paradoja de la corbata

de los sujetos económicos (*véase la figura 3*).

Sin embargo, el matemático no tiene que hacer psicología, y estos ejemplos no le preocupan demasiado; pasemos, pues, a problemas más delicados aún, en los cuales la noción de esperanza matemática queda todavía más seriamente en entredicho.

La paradoja de San Petersburgo

La clásica paradoja de San Petersburgo debe su nombre al estudio que le dedicó Daniel Bernoulli en los comentarios de la Academia de Ciencias de San Petersburgo en 1738; pero en realidad fue Nicolas Bernoulli —tío de Daniel— quien la inventó y la explicó a Pierre Rémond de Montmort (este último le menciona en su ensayo *Essai d'analyse des jeux de hasard*, de 1701).

La cuestión consiste en saber cuánto ha de pedirle la banca a un apostante para que el juego siguiente sea equitativo.

Se lanza una moneda hasta que salga cruz. Si se obtiene cruz en el primer lance, la banca le paga 2 ptas al apostante, y el juego se acaba. Si sale cruz en el segundo lanzamiento, la banca le paga 4 ptas y el juego se acaba. Si la cruz sale en el tercer intento, la banca le paga 2^3, o sea, 8 ptas y el juego se acaba, etc.

El cálculo de la esperanza matemática no es difícil: quien logra cruz en el primer intento recibe 2 ptas con una probabilidad de 1/2; quien lo hace en el segundo intento recibe 4, con una probabilidad de 1/4; quien lo consigue en el tercero, recibe 8 ptas, con una probabilidad de 1/8, etc. —por tanto, la esperanza de ganancia (si la partida es gratuita) es de $2 \times (1/2) + 4 \times (1/4) + 8 \times (1/8) + 16 \times (1/16) + ... = 1 + 1 + 1 + 1 + ...$

El valor de esta suma es infinito. Ello significa que se debe poner una suma infinita para que el juego sea equitativo: aunque la banca nos exigiera un millón de pesetas por jugar, la esperanza matemática seguiría siéndonos infinitamente favorable. Sin embargo, estoy seguro de que el lector no aceptaría arriesgar ni siquiera 100 ptas en semejante partida. ¿Qué es lo que no funciona?

Podríamos invocar la noción de utilidad, como hace un momento, y decir que se trata de un problema de psicología. Creo que se puede hacer mejor, porque lo que no funciona es que la banca, al proponer este juego —por 100 ptas, pongamos por caso— hace trampa. En efecto, la banca dispone solamente de una suma finita y por consiguiente no tiene en cuenta los casos, raros pero fundamentales, en los que ya no podrá cumplir sus compromisos al organizar el juego. Si realizamos los cálculos con la hipótesis de que la banca sólo dispone de 1 millón de pesetas (que es, por consiguiente, la cantidad máxima que puede perder) entonces la esperanza de ganancia es: $2 \times (1/2) + 4 \times (1/4) + 8 \times (1/8) + ... + 2^{19} \times (1/2^{19}) + 1000.000 \times (1/2^{19}) = 20{,}91$ ptas (el último término corresponde a todos los casos en los que se dan diecinueve caras consecutivas o más antes de sacar cruz, y en los cuales el banquero otorga un millón de pesetas al jugador cuando debería pagarle aún más). Esta apuesta de 20,91 ptas para hacer que el juego sea matemáticamente equilibrado es razonable. ¡Con una banca que sólo disponga de un millón, la partida vale 20,91 ptas, ni un céntimo más!

La paradoja del cambio inútil

La paradoja siguiente me ha sido presentada por Claudio Bernardi, de la Universidad de Roma. Me enseñan dos sobres cerrados, *A* y *B*, que contienen *X* ptas y 2*X* ptas, sin que yo pueda saber cuál es el que contiene más. Yo gano el contenido del que elija. No teniendo razón particular para preferir uno a otro, opto por el sobre *A*, pero después, en el momento de ir a abrirlo, razono como sigue: si el sobre *A* contiene *Y* ptas (yo no sé si *Y* es igual a *X* o a 2*X*), existe una oportunidad entre dos de que *B* contenga 2*Y* ptas y una oportunidad entre dos de que *B* contenga *Y*/2 ptas. Por consiguiente, la esperanza del contenido del sobre *B* es $2Y \times (1/2) + (Y/2) \times (1/2) = 1{,}25\ Y$ ptas. Este valor supera a la esperanza del contenido del sobre *A*, que es, ob-

viamente, de *Y* ptas. Me conviene, por tanto, cambiar y optar por abrir *B*. Pero este razonamiento es a todas luces falso, pues si hubiera empezado eligiendo el sobre *B* habría podido hacer el mismo razonamiento y concluir que era *A* el preferible. ¿Qué es lo que no funciona?

La explicación de esta paradoja se parece a la de la paradoja de San Petersburgo, en el sentido de que, para evitar la paradoja, basta precisar bien las hipótesis y evitar toda hipótesis tácita que pudiera ser irrazonable.

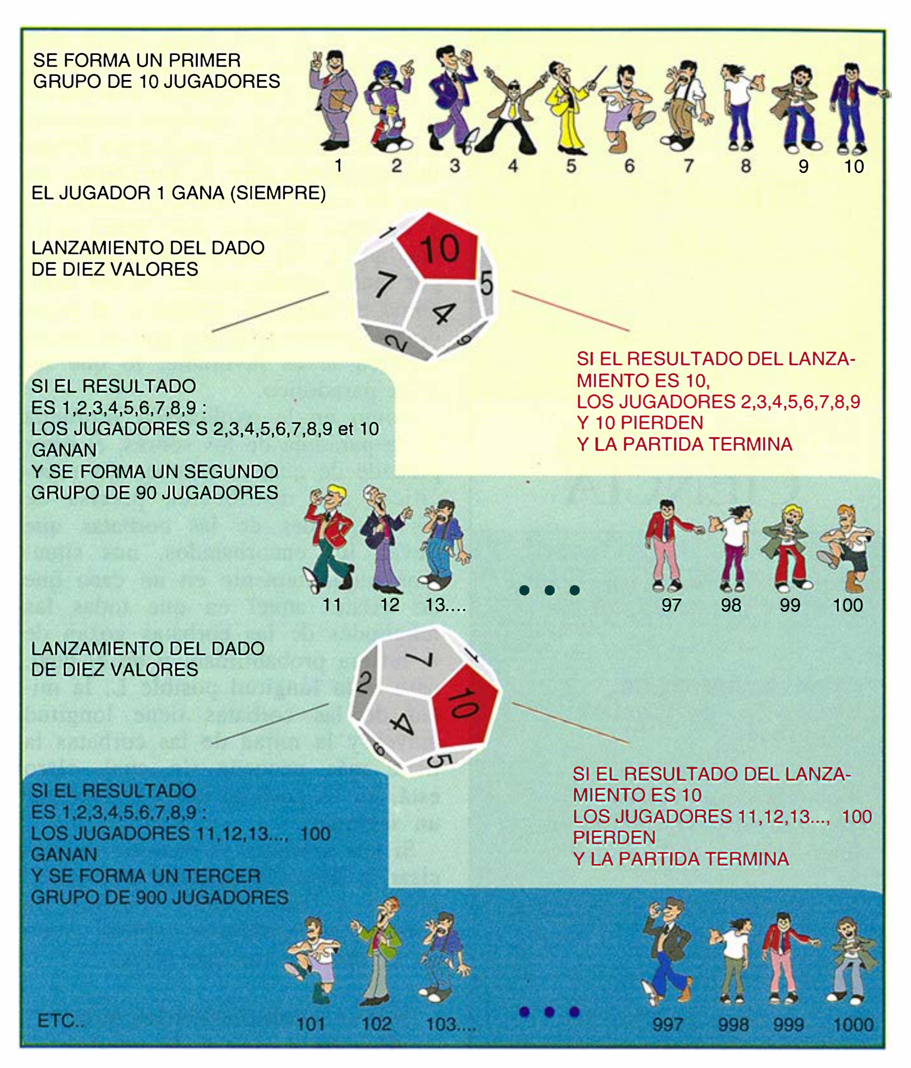
Resulta necesario, pues, negarse a considerar que todos los valores de *X* son posibles, porque el banquero que me propone el juego no utilizará más de una cierta suma para llenar los sobres. Imaginemos que usted decide llenar al azar los sobres con 1 pta – 2 ptas, o 2 ptas – 4 ptas, o 3 ptas – 6 ptas, etc., hasta 10 ptas – 20 ptas, sin favorecer ninguno de estos casos (o sea, eligiendo con la misma probabilidad un número entre 1 y 10), y que después mezcla los dos sobres llenos para no saber cuál contiene mayor cantidad. Los casos posibles son ahora fáciles de enumerar: (1, 2) – (2, 1), (2, 4) – (4, 2), (3, 6) – (6, 3), (4, 8) – (8, 4), (5, 10) – (10, 5), (6, 12) – (12, 6), (7, 14) – (14, 7), (8, 16) – (16 ,8), (9, 18) – (18, 9), (10, 20) – (20, 10). Todos los casos tienen la misma probabilidad: 1/20. El cálculo de la esperanza de B da el mismo valor que el de la esperanza de *A* (resulta ser 8,25) y no 1,25 veces más. ¡No hay paradoja alguna!

¿Dónde está el error del razonamiento formulado más arriba? En dos cosas: (*1*) implícitamente se considera que todos los valores de *X* posibles tienen la misma probabilidad, lo cual es falso; así, el 5, por ejemplo, no aparece más que una sola vez como valor posible del contenido de *A*, mientras que 8 aparece dos veces; (*2*) se considera también que por cada sobre *A* hay una posibilidad entre dos de que el otro contenga dos veces menos, lo cual es falso: si el sobre *A* contiene 3 ptas, por ejemplo, el único valor posible para *B* es 6 ptas.

Al efectuar los cálculos de forma precisa partiendo de hipótesis establecidas de la forma más razonable posible no subsiste ninguna paradoja. Todo sistema de hipótesis razonables (cantidades finitas de dinero, procedimiento bien determinado para colocar los sobres en su lugar) que se elija nos llevará a encontrar que la esperanza de *B* es la misma que la de *A*, y por consiguiente jamás encontraremos paradojas en los casos reales.

Vale la pena indicar una explicación compatible con estas hipótesis, aunque sea más profunda. En el razonamiento falso que conduce a la paradoja no se tiene nunca la impresión de que estemos equivocándonos, porque parece razonable imaginar un caso ideal en el cual todos los valores posibles del contenido de *A* tienen la misma probabilidad (lo cual, como hemos visto, no sucede al analizar el caso con detalle), y tal que, para cada uno de los valores posibles del contenido *Y* del sobre *A*, el contenido del sobre *B* es 2*Y* en una de cada dos veces, y de *Y*/2 en una de cada dos veces. Pero este caso ideal que presuponemos (sin preguntarnos si existe), en realidad es imposible, porque impone una atribución uniforme de probabilidades a todos los números enteros (los valores posibles del contenido de *A*), atribución imposible como nos damos cuenta enseguida: si atribuimos a cada entero una probabilidad positiva igual, la suma de las probabilidades será mayor que 1; si les atribuimos una probabilidad nula, la suma de las probabilidades será nula.

Los matemáticos saben que no existe una distribución uniforme de probabilidad en los enteros, o sea, que resulta imposible decir: "sea un número entero elegido al azar, asignándole la misma probabilidad a cada número entero". Esta es la clave profunda de la paradoja de los sobres: ¡hay que evitar los razonamientos que presuponen la existencia de cosas inexistentes!



5. Dado que sólo el resultado 10 hace perder, un jugador tiene 9 oportunidades entre 10 de ganar. Pero, al concluir una partida, nueve jugadores de cada diez han perdido, y el jugador tiene 9 ocasiones entre 10 de perder. ¿Qué es lo que está mal?

La paradoja de la corbata

La explicación sirve igualmente para la paradoja de la corbata, propuesta por Maurice Kraitchik en 1930: *A* le propone a *B* que aquel de los dos que tenga la corbata más larga se la regale al otro. *B* razona como sigue: "Mi corbata tiene longitud *L*. Si mi





ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Claves de hormigón,
de Gary Stix (MATERIALES)
Junio 1993

Cosmos inconstante,
de Corey S. Powell (ASTROFÍSICA)
Julio 1993

La muerte de la demostración,
de John Horgan (MATEMÁTICAS)
Diciembre 1993

Al corriente, de Philip Yam
(SUPERCONDUCTIVIDAD)
Febrero 1994

La metafísica de las partículas,
de John Horgan (FÍSICA)
Abril 1994

Piratería electrónica,
de Paul Wallich (COMUNICACIONES)
Mayo 1994

¿Puede explicarse la conciencia?,
de John Horgan (NEUROCIENCIAS)
Septiembre 1994

La crisis crónica de la programación,
de W. Wayt Gibbs (INFORMÁTICA)
Noviembre 1994

¿Muere la letra impresa?
de Gary Stix
(COMUNICACION CIENTIFICA)
Febrero 1995



corbata es la más larga, estoy ante una posibilidad entre dos, la pierdo, y pierdo por consiguiente una corbata de longitud *L*. En caso contrario, gano la corbata del otro, cuya longitud es mayor que *L*. Por tanto, en una de cada dos veces yo pierdo *L*, y en una de cada dos veces gano más que *L*. Mi esperanza es positiva; por tanto, acepto jugar." Ahora bien, como el juego es simétrico, el jugador *A* puede concluir que el juego también le es favorable, lo que resulta paradójico.

Como en la explicación profunda de la paradoja de los sobres, el error procede de que, al razonar sin especificar una distribución precisa de las longitudes de las corbatas que llevan los encorbatados, nos situamos implícitamente en un caso que no existe: aquel en que todas las longitudes de las corbatas gozan de la misma probabilidad, y en el cual, para cada longitud posible L, la mitad de las corbatas tiene longitud mayor y la mitad de las corbatas la tiene más pequeña (lo cual, claro está, no es posible; basta reflexionar un segundo).

Si nos tomamos la molestia de precisar la situación (asignar una probabilidad a cada posible longitud de corbata) la paradoja se esfuma, como en el caso de los dos sobres.

Nueve probabilidades sobre diez de ganar y de perder

La conclusión de la última paradoja que propongo es verdaderamente sorprendente. Esta paradoja me ha sido inspirada por un ejemplo análogo inventado por el filósofo J. Leslie.

Hay un banquero y jugadores. Cada jugador arriesga 100 ptas. Si gana, recupera sus 100 ptas más otras 100 ptas que le da el banquero. Si pierde, el banquero se queda con las 100 ptas del jugador. El banquero utiliza un dado imaginario de 10 valores equiprobables. El banquero constituye como sigue al grupo de jugadores. El grupo 1 está formado por 10 jugadores, numerados de 1 a 10. El jugador 1 gana siempre. El grupo 2 consta de 90 jugadores, numerados de 11 a 100. El grupo 3 consiste en 900 jugadores, numerados de 101 a 1000, etc. No es necesario que los grupos sean constituidos de antemano.

El banquero lanza el dado. Si obtiene un 10, los jugadores 2, 3, ..., 10 del primer grupo pierden, y la partida termina. Por tanto, en ese caso, 9 jugadores han perdido y 1 jugador (el número 1) ha ganado.

En caso contrario (o sea, si ha obtenido 1 o 2 o ... 9 en el primer lance) los 10 jugadores del grupo 1 ganan y el banquero arroja el dado una segunda vez. Si ahora resulta un 10, los 90 jugadores del grupo 2 han perdido y la partida concluye. Por tanto, en tal caso, son 90 los jugadores que han perdido y 10 los que han ganado.

En caso contrario (si ha obtenido 1 o 2 o ... 9 en el segundo lanzamiento), los 90 jugadores del grupo 2 ganan y el dado es lanzado por tercera vez. Si resulta un 10, los 900 jugadores del grupo 3 han perdido, y la partida termina. En tal caso, un total de 900 jugadores han perdido y 100 = 10 + 90 jugadores han ganado. Y así sucesivamente.

Observemos que cualquiera que sea el momento en que se produzca la conclusión del juego, al terminar la partida, exactamente 9 de cada 10 jugadores han perdido, y 1 de cada 10 ha ganado. Cada partida del juego "9 de cada 10" es finita, porque la probabilidad de que nunca salga un 10 es nula.

La partida comienza y el banquero se dispone a constituir el grupo siguiente. El banquero nos pregunta si aceptaríamos jugar (sin decirnos qué número vamos a tener). He aquí dos razonamientos posibles.

Razonamiento 1. Voy a arriesgar 100 ptas y se va a lanzar el dado. La probabilidad de que pierda es 1/10, puesto que sólo pierdo si sale el 10 (en el primer lanzamiento es incluso un poco menor, pues es seguro que el número 1 va a ganar). Por tanto, como tengo más de 9 posibilidades en 10 de ganar, acepto jugar.

Razonamiento 2. Entre todas las personas a quienes el banquero les propone el juego, y sea cual sea la duración de la partida, exactamente 9 de cada 10 jugadores pierden. Si acepto, paso a ser uno cualquiera de los jugadores, sin nada que me diferencie de los demás a quienes el banquero ha propuesto el juego. Como 9 de cada 10 jugadores pierden, tengo 9 posibilidades de 10 de perder. Rechazo, pues, entrar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LA STRATÉGIE DE L'INTERPRÈTE. D. Dennett. Nrf Essais, Gallimard, París, 1990.

L'ORDINATEUR ET L'ESPRIT. P. N. Johnson-Laird. Editions Odile Jacob, París, 1994.

UNCERTAINTY AND THE DIFFICULTY OF THINKING THROUGH DISJUNCTIONS. E. Shaffir, en *Cognition*, 50, páginas 403-430, 1994.

ADVANCES IN PROSPECT THEORY. A. Tversky y D. Kahneman, en *Journal of Risk and Uncertainty*, 5, páginas 297-323. 1993.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

A vueltas con las mesas

En el piso 67 de Torrerrufas dos empleados de mudanzas arrastraban al interior de una sala la última de nueve mesas. La puerta se cerró tras ellos.

"Asunto terminado", dijo Dany, jadeante. "Una comprobación final: dos mesas cuadradas en roble macizo, seis mesas rectangulares —cuatro de pino y dos de formica— y una enorme, cuadrada, antigua, en caoba."

"Correcto", dijo Max, mientras las tachaba de la tablilla portapapeles.

"¡Vaya, hombre! Hay una gotera en el techo y está cayendo directamente sobre la mesa antigua. Vamos a tener que cambiarla de sitio; si no, se estropeará."

"No va a ser fácil", hizo notar Max. "Calculo que lo tendríamos resuelto si pudiéramos mover las dos mesas de formica, colocándolas debajo de la gotera, y llevando la mesa antigua hasta el rincón de enfrente, por si acaso la gotera se extiende. Podemos ir corriendo las mesas, una por una, hacia el espacio que queda y de esta forma iríamos creando nuevos huecos en los que ir encajando las otras."

Treinta minutos más tarde habían logrado mover la mesa antigua hasta el centro de la pared de la derecha, situándola más o menos fuera de peligro, pero ahora se estaba mojando una de las mesas de pino, y la puerta había quedado bloqueada.

"Lo que necesitamos es un mapa de rompecabezas."

Dany se quedó mirándole con cara rara. "¿Estás 'flipao'? Los rompecabezas no tienen mapas."

"Lamento contradecirte, pero los rompecabezas sí tienen mapas conceptuales, mapas imaginarios que vemos en la mente. Mapas que te muestran todas las situaciones del problema y la forma de pasar de unas a otras."

Dany asintió con la cabeza. "Pues Max, este mapa va a ser un mapa complicado, complicado de veras. Hay un montón de situaciones... y de jugadas."

"Cierto. Más vale que atinemos con alguna forma de descomponer el problema en partes más sencillas. Averigüemos primero qué cosas se pueden hacer fácilmente. Después, tal vez podamos enlazar de alguna forma estos movimientos simples."

"Bueno, si hay un hueco cuadrado que sólo contiene las dos mesas más pequeñas, podemos moverlas con bastante libertad de un sitio a otro", dijo Dany.

"Esa es la idea. Hay que localizar algo así como subproblemas, en los cuales solamente haya que mover unas cuantas mesas por el interior de una región bien definida [*véase la figura 3*]. Humm... Aquí tenemos un caso, un poco más complicado, con una región rectangular que sólo contiene dos mesas rectangulares y dos mesas cuadradas."

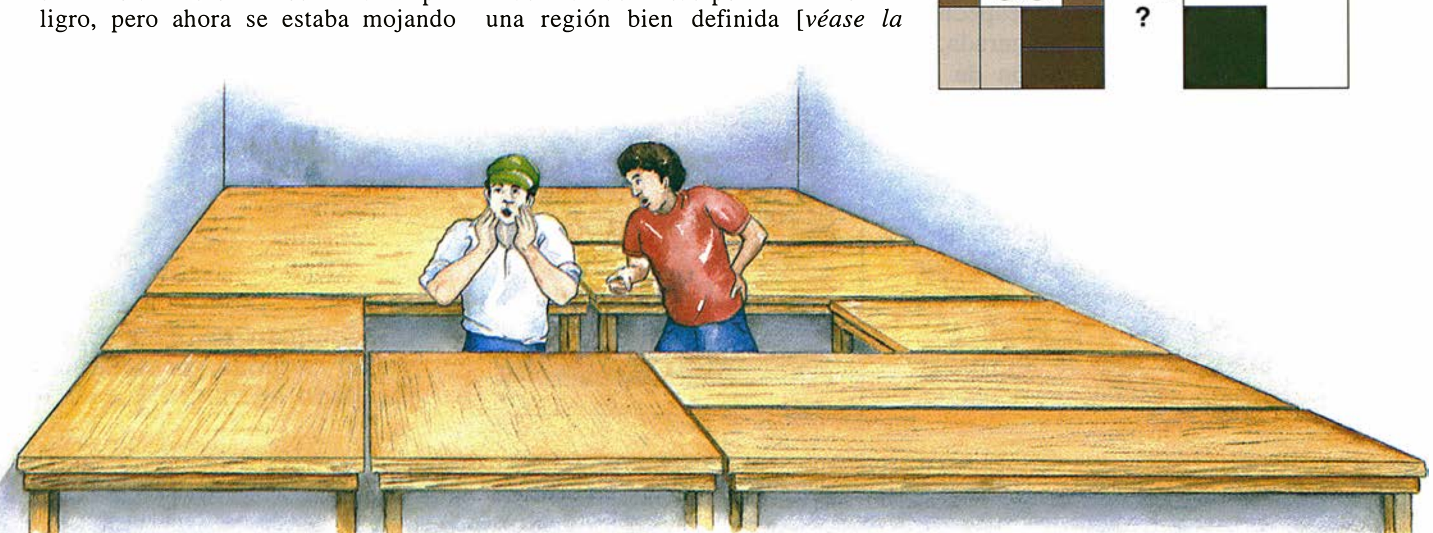
"Se podría suponer que las posiciones que se diferencien llevando mesas de acá par allá por el interior de estos subproblemas son en realidad una misma", dijo Dany. "De esa forma podremos reducir bastante la lista de posiciones."

"Sí. Y a veces solamente hay una forma razonable de seguir moviendo las mesas, si no queremos deshacer lo ya hecho."

"Por tanto, suponiendo que uno sepa de dónde se parte y adónde quiere llegar, ¿podrían quedar fuera del mapa secuencias como ésa?"

"Cabalmente. Acércame esa tablilla portapapeles." En un instante, Max había dibujado un mapa que mostraba algunas de las posiciones y movimientos posibles [*véase la figura 4*].

"He señalado las posiciones inicial y final", explicó Max. "Así pues, sólo hay seis formas distintas de si-



1. Dany y Max, de mudanzas, representados por círculos en el diagrama, están rodeados por nueve mesas. Con el fin de que las mesas queden a salvo de la humedad han de moverlas hasta que las dos de formica encajen en el ángulo superior izquierdo, debajo de la gotera.

2. La secuencia de movimientos ilustra cómo empezaron Dany y Max a redisponer las mesas, consiguiendo llevar la gran mesa cuadrada antigua hasta la pared de la derecha.

tuar las mesas clave, que he rotulado A, B, C, D, E y F."

"Yo hubiera esperado que fueran más de seis."

"Y lo son. Lo que ves sólo es una parte del mapa. Mas, para resolver el rompecabezas, bastan seis. Las líneas indican secuencias de movimientos obligados —en el sentido de que, si sabes dónde has de comenzar y en dónde has de terminar, los movimientos intermedios son obvios, porque, en cada paso, solamente dispones de una elección. ¿Estás de acuerdo?"

"Veo y controlo."

"Estupendo. He sombreado regiones rectangulares en las que hay un subproblema que resolver. Para mostrar cuál, he dibujado figuritas de las posiciones inicial y final dentro del rectángulo, en los extremos adecuados de las líneas de enlace."

Dany abrió la boca como un pececillo de acuario. "Lo siento, no te sigo."

"Bueno, supongamos que quieras saber cómo mover desde C hasta E. Fíjate en la línea horizontal que los une; pasa a través de dos diagramas pequeños. Si reemplazas la región sombreada de C con el diagrama de la izquierda y la región sombreada de E por el diagrama de la derecha, tendrás las posiciones inicial y final. Dado que los movimientos intermedios son "obligados", no se tarda mucho en averiguarlos. Si hacemos una copia del rompecabezas con piezas de cartulina, se puede moverlas de un sitio a otro y verificarlo."

"¿Qué significa 'SIN SALIDA'?"

"Venga, tío, ¿qué va a ser? Veamos, ¿qué nos dice el mapa?"

"Dónde se encuentra cada cosa y la forma de ir de una a otra. Bueno, más bien, indicaciones para hacerlo."

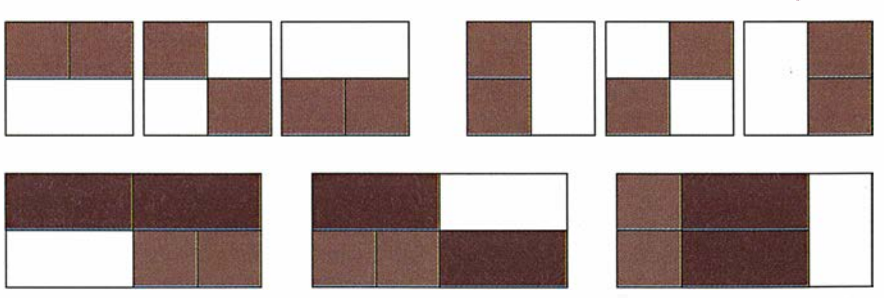
"Nos dice más que eso. Nos señala que una forma de resolver el rompecabezas consiste en seguir la ruta 'INICIO-C-A-B-FIN'."

La admiración iluminó el rostro de Dany. "¿Y se podría ir también por INICIO C-D-B FIN?"

"Desde luego. O también 'INICIO-C-E-F-D-B-FIN'; aunque esa ruta sería innecesariamente complicada."

Dany le estaba cogiendo el tranquillo. "También podría ser INICIO-C-D-F-E-C-D-B-A-B-D-C-E— "

"Así es", le interrumpió Max, "pero esa ruta sería todavía más complicada sin ninguna ventaja."



3. Los subproblemas indican algunas maniobras útiles. En cada uno de ellos, resulta fácil redisponer las mesas sin salirse de los contornos señalados.

4. Mapa parcial del rompecabezas, que muestra dónde pueden colocarse ciertas mesas clave y la forma de pasar de una posición a otra. Las líneas indican secuencias de movimientos que son esencialmente obligatorios si se sabe la situación a la que se quiere llegar. Los diagramas pequeños muestran cómo han de quedar dispuestos los subproblemas al principio y al final de estas secuencias.

COMIENZO
A
C
E
?
?
?
B
D
F
?
?
FIN
SIN SALIDA

Al cabo de un ratito habían movido las mesas, dejándolas de modo que la mesa antigua se hallara lejos de la gotera, que las dos mesas de formica estuvieran debajo de la fuga y que la puerta quedara despejada y accesible. Habiéndose perdido tanto el almuerzo como la cena, Dany y Max rabiaban de hambre. Salieron a toda velocidad hacia la primera planta y se encaminaron al Palacio de la Pizza.

"¿Quieres que te diga una cosa? Pues no fue tan difícil", dijo Dany.

"Una vez hecho el mapa, no. Pero tuvimos suerte. Era un mapa sencillo."

"Eso pasó porque utilizaste algunos trucos para simplificarlo."

"Esos trucos facilitan la tarea, pero hay muchísimos rompecabezas de piezas deslizantes cuyos mapas son muchísimo más complicados, por muchos trucos que se te ocurran."

"¿Como cuáles?"

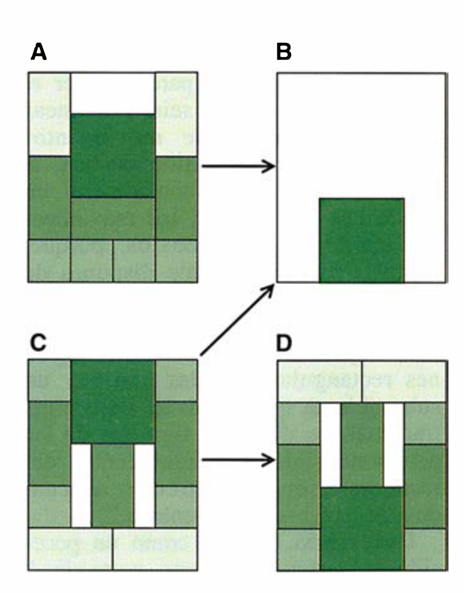
"Bueno, está el del 'Borrico', que probablemente fue inventado en Francia el siglo pasado. Ese es bastante más difícil. El del 'Ciento', inventado hacia 1980, es más difícil todavía; para resolverlo hacen falta 100 movimientos. Y si se exige que la posición final haya de ser como la posición inicial vuelta cabeza abajo, el problema es duro de pelar. Esa versión se llama 'Ciento y medio', porque hacen falta 151 movimientos.'

Max encargó una pizza gruesa con doble de queso. Dany, por su parte, pidió una especial con un montón de aderezos —pimientos, bonito, pepinillos, piña, tamales calientes, un plátano entero, chicle, regaliz y una barrita chispeante encendida.

Cuando llegaron las pizzas, la de Dany no parecía estar bien del todo. La mayoría de los ingredientes estaban cabeza abajo, corteza incluida.

"Devuélvela", le sugirió Max.

"Ni pensarlo. Ante un problema no puedo resistirme." Se enderezó en su asiento, cuadró los hombros y echó mano a la tablilla portapapeles. "Espera a que haya hecho un mapa de esta pizza."



5. En el rompecabezas del borrico hay que mover las piezas desde la posición que muestra el diagrama A hasta la del diagrama B. En el del "Ciento" hacen falta 100 movimientos para redisponer los bloques, pasando de C a B. El llamado "Ciento y medio", de C a D, requiere 151 jugadas.

Libros

Luis Alonso, José López Barneo, Joan Armengol y Eduardo Battaner

Renacimiento español

Recuperado

COLECCIÓN DOCUMENTAL DEL DESCUBRIMIENTO (1470-1506). Edición preparada por Juan Pérez de Tudela, Carlos Seco, Ramón Ezquerra y Emilio López. Real Academia de la Historia-CSIC-Fundación Mapfre. Madrid, 1994.

LAS RELACIONES ENTRE PORTUGAL Y CASTILLA EN LA ÉPOCA DE LOS DESCUBRIMIENTOS Y LA EXPANSIÓN COLONIAL. Dirigido por Ana María Carabias. Ediciones Universidad; Salamanca, 1994.

LA CIENCIA EN EL MONASTERIO DEL ESCORIAL. AA. VV. Ediciones Escurialenses; San Lorenzo, 1994.

AN ARISTOTELIAN RESPONSE TO RENAISSANCE HUMANISM. JACOPO ZABARELLA ON THE NATURE OF ARTS AND SCIENCES, por Heikki Mikkeli. SHS; Helsinki, 1992. **GEORGIUS AGRICOLA**, por Gisela-Ruth Engewald.Teubner-Verlag der Fachvereine; Stuttgart-Zurich, 1994. **TYCHO BRAHE: URANIA TITANI**. Edición preparada por Peter Zeeberg. Museum Tusculanums Forlag; Kobenhavn Universitet, 1994.

El Renacimiento español abarca un siglo largo, desde los Reyes Católicos hasta la muerte de Felipe II, en 1598. Durante ese intervalo, la nación, consolidada su unidad política interna, echa los fundamentos para la construcción de un imperio transoceánico. Se crean la Casa de la Contratación de Sevilla, el Consejo de Indias y la Academia de Matemáticas de Madrid. Se erige El Escorial. Y de acuerdo con la metáfora socorrida, en el firmamento español brilla una pléyade de ingenieros, cosmógrafos, matemáticos, naturalistas y médicos. De la técnica y la cosmografía en ese período nos hablan Nicolás García Tapia y Víctor Navarro en *Las relaciones entre Portugal y Castilla en la época de los descubrimientos y la expansión colonial.* Para conocer la medicina, la química y la farmacia, nos ayudarán párrafos de algunos capítulos de *La ciencia en el Monasterio del Escorial.*

Antes, sin embargo, conviene detenerse en una obra monumental, dirigida por Juan Pérez de Tudela, autor de una novedosa y antológica introducción a la cuestión colombina. Me refiero a la *Colección Documental del Descubrimiento (1470-1506)*, que ha visto la luz gracias al apoyo económico de la Fundación Mapfre, y cuya gestación nos cuentan Carlos Seco y Ramón Ezquerra. Nació el proyecto hace una cincuentena de años, cuando Antonio Ballesteros, maestro de americanistas, proyectó compilar el *Diplomatorio Colombino.*

Largo ha sido el empeño, recuerda Ezquerra, de reunir la documentación, abundantísima y dispersa, de Colón. Esfuerzo que empezó el propio ligur, quien, antes de emprender el tercer viaje, compareció ante el escribano público Martín Rodríguez y le encomendó en 1498 un traslado de los privilegios de los Almirantes de Castilla y de otros varios documentos, para evitar que perecieran sus derechos. A este códice, *Libro de los Privilegios*, le siguió una suerte de segunda edición que abarca documentos hasta 1502. Fuentes documentales en el siglo XVI son las *Historie* de Hernando Colón y la *Historia de las Indias* de Bartolomé de las Casas. Utilizaron documentos colombinos los cronistas Pedro Mártir de Anglería y Andrés Bernáldez. En el XVIII Juan Bautista Muñoz recorre archivos oficiales y particulares reuniendo un filón documental. De su concienzuda investigación surgió la idea de crear el Archivo de Indias, concentrando en Sevilla los numerosos documentos referentes a América guardados hasta entonces en Simancas. Pero los documentos permanecieron inéditos.

Por parte española, la historiografía colombina del siglo XIX tiene su máximo exponente en Martín Fernández de Navarrete y su *Colección de los viajes y descubrimientos que hicieron por mar los españoles desde finales del siglo XV*. Súmese a ella la *Colección de documentos inéditos de Indias*, de Joaquín Francisco Pacheco, Francisco de Cárdenas y Luis Torres de Mendoza. En 1892, la duquesa de Alba publica los *Autógrafos de Cristóbal Colón y Papeles de América*, continuados en 1902. Por parte extranjera, el renovador de los estudios colombinos fue Henry Harrisse, pero la obra cumbre de la documentación colombina es italiana: *Raccolta di Documenti e Studi pubblicati dalla R. Commissione Colombiana per il quarto centenario dalla scoperta dell'America.*

El objetivo del *Diplomatorio Colombino* era llegar a una edición exhaustiva de todos los documentos referentes a Colón durante su vida y a los hechos relativos a América hasta que se perdió su monopolio descubridor. Pérez de Tudela, convertido en director del proyecto transformado en *Colección Documental del Descubrimiento*, carga con el trabajo interpretativo de las conjeturas y los textos. Desde el quehacer del investigador hasta el objeto (descubrimiento) y personaje (Colón) historiados. Avanzando de lo general a lo particular, comienza por someter a crítica el estado de este campo holladísimo de la historiografía. En un estilo prieto y desenfadado desmonta, uno por uno, los lugares comunes: la historia positivista, la visión transcendentalista del descubrimiento, la sublimación personalista del protagonista que lo hace portador de una misión divina (Cristóbal, "Cristoferens"), el nacionalismo patriotero de los historiadores, la minusvaloración de otros implicados. "La operación de Colón cerca de los Reyes Católicos no muestra su verdadera naturaleza y entidad, ni se explica en sus vicisitudes, si no se sitúa en el suelo y dimensión que le corresponde; esto es, el de una licitación internacional, tal y como fue presentada por Colón a los Reyes y que afectaba a las cuatro potencias atlánticas." Fue, en opinión de Pérez de Tudela, un asunto eminentemente social, un asunto de economía, un asunto ideológico, un asunto científico y un asunto americano. Lo irá desgranando en el resto de su larga introducción, a través, primero, de su análisis minucioso de la biografía del Almirante por su hijo bastardo Hernando y, luego, en un análisis de los diversos elementos que convergen en la viabilidad de la hazaña.

Cuando muere la centuria décimosexta, algunos son conscientes de que les ha tocado vivir en una época de gracia: los descubrimientos geo-

gráficos, la brújula, la pólvora, la imprenta, el reloj, nuevos fármacos (guayaco y bálsamos), la destilación. Por encima de todo, había cambiado la visión del hombre y el mundo, una ecumene extendida hasta confines insospechados. Se multiplican los acueductos y canales de riego y se tienden redes de albañales. El protagonista de esta eclosión fue el ingeniero, cuya labor se entrecruza frecuentemente con la del arquitecto. Juan de Herrera, arquitecto-ingeniero de El Escorial, resolvió también el abastecimiento de agua a Valladolid e inventó máquinas para cortar el hierro, por ejemplo.

Llegaron a la corte ingenieros procedentes de Italia, los más adelantados entonces. Juanelo Turriano recibió de Felipe II el encargo de construir una máquina que elevase el agua desde el río Tajo al Alcázar y a la ciudad de Toledo. Las norias, los tornillos de Arquímedes, los tímpanos y otros instrumentos conocidos eran impotentes cuando había que elevar el agua a mayor altura de unos treinta metros, que era lo máximo que podía conseguirse a mediados del siglo XVI con los ingenios conocidos, incluidas las "tisibicas" o bombas de émbolo que aparecen en *Los veintiún libros de los ingenios* de Pedro Juan de Lastanosa.

Las invenciones abarcaban nuevos tipos de molinos, ferrerías, batanes, telares, bombas de elevación de agua, canales, presas, acueductos, puentes y otras obras de ingeniería. Se innovó también en las cartas náuticas e instrumentos de navegación. Se idearon bombas de achique del agua, las de Diego Ribeiro, Vicente Barroso y, sobre todo, las de balancín de Jerónimo de Ayanz. Para la navegación en tiempo de calma, Blasco de Garay inventó un mecanismo de paletas eficaz.

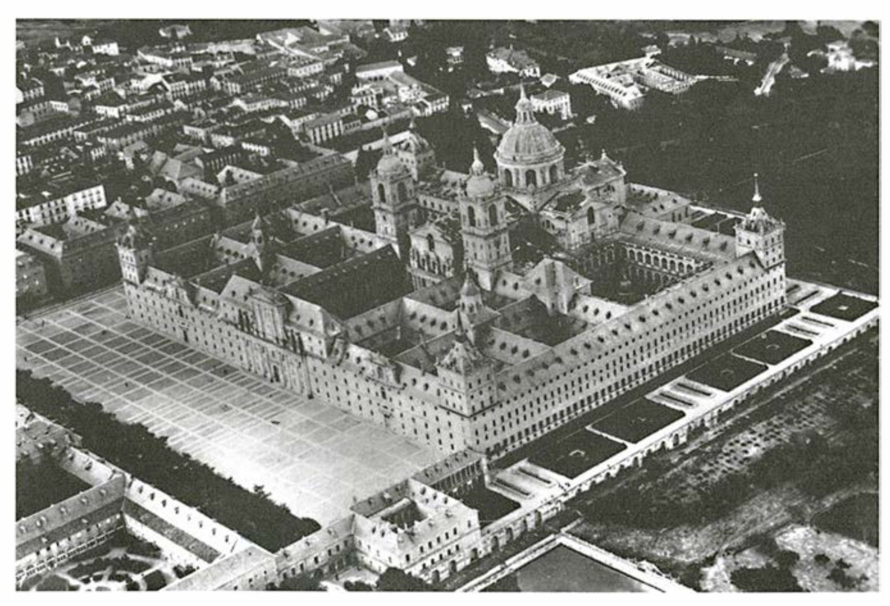
En la Casa de la Contratación de Sevilla se adiestraba a los pilotos y maestres en náutica y cosmografía, se diseñaban instrumentos y mapas y, a la vuelta de las travesías, se compilaba la información. En la Academia de Matemáticas de Madrid, se impartían también enseñanzas de cosmografía; aquí se vertieron al castellano obras de Euclides, Arquímedes, Teodosio y Apolonio. Se fue configurando, pues, un nuevo cuerpo de profesionales con excelente preparación. Gracias a ella, se observaron y registraron la declinación magnética y sus variaciones. Forjaron instrumentos para medirla y discutieron su naturaleza y causas y adelantaron unas primeras formulaciones teóricas. Martín Cortés atribuyó la orientación de la brújula a la existencia de un polo magnético. Santa Cruz y otros iniciaron el registro sistemático en las cartas de las variaciones magnéticas. Pedro Núñez descubrió la curva loxodrómica y describió un método para dibujar este tipo de curvas en un globo a partir de su definición matemática. Por fin, las exploraciones y descubrimientos geográficos instaron la aparición un nuevo concepto, el de *globo terráqueo*.

Mandado erigir por Felipe II para conmemorar la victoria de San Quintín, las obras del mausoleo real de El Escorial empezaron en 1563. Desde su idea fundacional, la biblioteca y la botica ocuparían un lugar central, que, para el historiador, constituyen, además, una ventana privilegiada para acercarse a la medicina, la química y la farmacia de la España renacentista. La biblioteca laurentina refleja la personalidad de su fundador. Solía acudir, en su mocedad, a las ferias de libros de Salamanca y Medina del Campo, donde se procuró obras de Arquímedes, Vitrubio, Ptolomeo, Pedro Apiano, Riesch y Copérnico. Con los años adquirió escritos de Hipócrates, Aristóteles, Dioscórides, Galeno, Plinio, Hermes Trismegisto, Regiomontano, Pico della Mirandola, Marsilio Ficino y Georgius Agricola. En total, varios miles de volúmenes, que formarán el germen de la librería escurialense. Aficionado a la alquimia y el hermetismo, contaba, además, con una buena colección de instrumentos científicos.

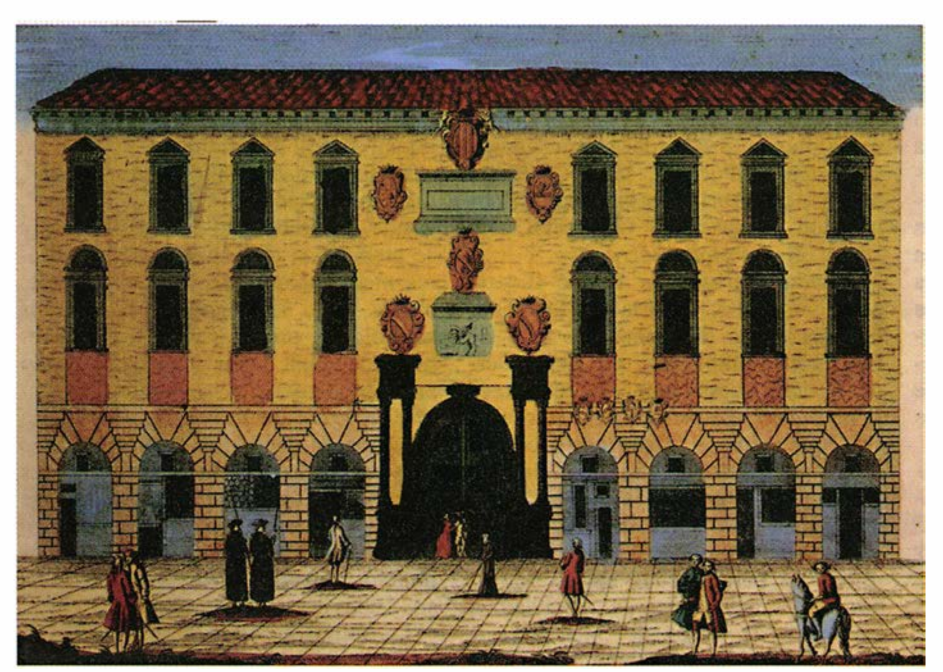
No se ha ponderado el valor de la entrega de la librería de Diego Hurtado de Mendoza, embajador en Venecia, frecuentada por científicos renacentistas de toda Europa. Cedida en el año 1576, aportó 853 códices. Se fueron agregando nuevos lotes. El más importante, 4000 códices árabes, adviene en 1614, botín de un acto de piratería contra el sultán de Marruecos Muley Cidán. Gran parte de ese legado y otras muchas donaciones se quemó en el incendio de 1671.

El Escorial disponía de una "botica", un laboratorio de varias "oficinas", donde se trabajaba en destilación y se preparaban drogas. Además de aceites medicinales y aromáticos (canela, clavo, anís, espliego o romero), los alambiques producían ácidos y alcoholes, en una labor a medio camino entre la alquimia y la química. Durante el reinado de Felipe II hubo cierta reactivación de la alquimia. Algo tuvo que ver ese afán con las dificultades financieras, pese al incremento de las importaciones de metales preciosos de las Indias. En la biblioteca podían consultarse obras de Paracelso, Libavius y Fioravanti.

La química, ciencia que entonces conjuga el arte de los metales, el ensayo, la destilación, la artillería y la preparación de drogas, halla su cifra en el *Arte separatoria* de Diego de Santiago. Especial relevancia alcanzaron las técnicas de amalgamación para el beneficio de la plata. Correspondía a los ensayadores controlar la ley de las monedas; a los destiladores, la producción de "aguas", "aceites" y "quintaesencias". Recuerda Portela que había una "destillatio per ascensum", aquella que es aplicable a las sustancias que emiten vapores ascendentes "puros y sutiles"; el vino sería un buen ejemplo de estas sustancias, que en la destilación se desprendería alcohol. Y una "destillatio per descensum" de las sustancias ricas en "humedad flegmática", que era aplicada para la obtención de aceites esenciales, después de una



Monasterio de El Escorial



Entrada principal de la Universidad de Padua, en un grabado del siglo XVII

extrusión y decocción del agua. Se hablaba también de una "destillatio per filtrum", un simple filtrado. De Santiago entiende que los elementos no son fijos, sino que se transmutan unos en otros, no en forma libre, sino en una orientación dirigida.

Sobre lo que hoy llamaríamos ciencias de la salud velaba el Real Tribunal del Protomedicato, establecido en 1477. En la segunda mitad del siglo XVI se reglamenta la formación de médicos, cirujanos y boticarios, que exige a los médicos una sólida preparación universitaria y una práctica vigilada a cirujanos y apotecarios. Se unifican, asimismo, medidas y procesos usuales en farmacia. La división de funciones promueve la aparición de las "concordias", barcelonesas primero y cesaraugustanas luego, que son farmacopeas donde se registran los medicamentos obligados. Surgen los primeros libros sobre el quehacer apotecario, como el de Pere Bonet y Matheu, deudo todavía de los "cánones" árabes y bajomedievales.

La medicina renacentista se muestra permeable a diversas influencias innovadoras, sin que desaparezca la plantilla general galenista, tradicional o transformada. Se abre a las ideas herméticas (vehiculadas por el platonismo), al hipocratismo, a la yatroquímica y al atomismo, por más que esta última corriente será mucho más eficaz en la centuria siguiente. Junto a una medicina académica persiste una medicina popular, no siempre confinada a las minorías. Siguiendo los pasos de su maestro López Piñero, Barona esquematiza ese ámbito, destacando las figuras de Pere d'Oleza, Bernardino Montaña de Monserrate y Miguel Sabuco.

Pero si España era epicentro político, la cultura europea compartía otros focos. Alguna idea de ello podremos sacar de la lectura de tres ensayos rigurosos sobre autores que dejaron su sello en teoría del conocimiento, minería y astronomía. Heikki Mikkeli ha abordado un tema nodal del Renacimiento paduano, en su estudio *An Aristotelian Response to Renaissance Humanism. Jacopo Zabarella on the Nature of Arts and Sciences*. Jacopo Zabarella (1533-1589) enseñó lógica y filosofía natural en la Universidad de Padua. Sobre ambas escribió largamente.

La investigación reciente considera la obra de Zabarella culminación del aristotelismo renacentista y precursora de la ciencia moderna. En el pórtico de sus *Opera logica* traza una distinción entre el mundo eterno de la naturaleza y el contingente de lo realizado por el hombre. A partir de esa división establece dos tipos de conocimiento y dos métodos diferentes de producirlo. Bajo la guía de Aristóteles, Zabarella reconoce cinco hábitos intelectuales: la ciencia (conocimiento demostrativo), la prudencia (hábito de las acciones morales), el arte (hábito de la producción de cosas materiales), la inteligencia y la sabiduría.

En el segundo libro de los *Físicos*, Aristóteles clasificaba ya los objetos en naturales y artefactos producidos por el hombre, los segundos de los cuales imitan los modelos y métodos de la producción natural. Pero el Renacimiento puso en cuestión que el arte llegara nunca a superar los logros de la naturaleza; en particular, la mecánica se convirtió en la disciplina que delimitaba la frontera entre el movimiento natural y el artificial. En las disciplinas productivas, señala Zabarella, no es necesario definir las cosas con tanto rigor como en las ciencias contemplativas; la razón de ello es porque las artes productivas no buscan el conocimiento, ni en ellas el conocimiento tiene que ser completo. El sujeto de una ciencia es lo que es necesariamente, pero el sujeto de un arte es la producción de cosas que no existen aunque el hombre pueda realizarlas. El filósofo no busca producir nada, sino conocer y ordenar las formas de cosas eternas existentes. Aristotélico hasta la médula, Zabarella define la naturaleza como aquello que tiene un principio de movimiento en sí mismo.

En Padua se debate sobre la naturaleza de la lógica, su contenido y uso (o fin). Zabarella sostiene que la lógica no es ciencia. Para demostrarlo establece una división entre nociones primeras y segundas. Mientras que el filósofo trata de las nociones primeras, el lógico se ocupa de las nociones segundas. Las nociones primeras remiten directamente a los objetos reales a través de los conceptos de los mismos. Las primeras nociones no las creamos. Aun cuando el hombre les ponga nombre, existen fuera del mismo. Las segundas nociones (género, especie, nombre, verbo, preposición) se relacionan directamente con las nociones primeras y, por ende, sólo indirectamente con las cosas. Las segundas nociones están creadas por la mente humana. La lógica se ocupa de las nociones segundas; procede a partir de la gramática. La lógica, un hábito instrumental intelectual, se desdobla en natural y artificial. La natural contiene todos los medios de razonar y argumentar que los seres humanos poseen por nacimiento, y carece de reglas formales; por artificial entiende las reglas formales silogísticas. La lógica es, pues, un instrumento de la ciencia, no una ciencia.

El silogismo constituye el género común y forma de todos los métodos. El método resolutivo procede del efecto a la causa; el demostrativo, de la causa al efecto. La inducción es una subespecie del método resolutivo. La ciencia avanza del conocimiento de los principios al co-

nocimiento cabal de los efectos por medio de la demostración.

Gisela-Ruth Engewald ha reelaborado su *Georgius Agricola*, una biografía clásica en su sencillez. Georg Pawer (1494-1555), *Agricola*, nació en Glauchau, Sajonia. Estudió humanidades en la Universidad de Leipzig, que le valieron para ocupar un primer puesto docente de latinidad en Zwickau. Carrera que abandona por la de medicina. Emprende el obligado viaje a Italia. En 1523 se le encuentra en Bolonia, luego en Venecia, en el equipo que prepara, en torno a Gianbattista Opizzoni la edición aldina de Galeno. Participó también en la edición de Hipócrates, Oribasio y Aecio.

En 1527, se le nombra farmacéutico y médico de Sankt-Joachimsthal, cuyas minas de los contornos constituyen el tema del *Bermannus sive de re metallica dialogus*, preludio del *De re metallica*. En esta orientación temprana hacia la mineralogía desempeñaron un papel importante el medio y el momento. En efecto, la región experimentaba modificaciones económicas y sociales a raíz del descubrimiento de filones de plata. El subsuelo de Sankt-Joachimsthal registra una historia geológica larga y atormentada: rocas antiguas, intervenciones sucesivas de ciclos tectónicos, intrusiones magmáticas y metamórficas, y soluciones hidrotérmicas metalíferas. Las venas orientadas este-oeste y surnorte mineralizaron en uranio, en arseniuros de cobalto y níquel, en arsénico nativo, platas rosas y sulfuros de plata, arsénico y antimonio, en galena, blenda, calcopirita y pirita.

En el *Bermannus* Agrícola se propone aclarar el vocabulario mineralógico con el fin de ayudar a los médicos en el entendimiento de los remedios minerales, *metallica pharmaca*, que pueden hallar en su propio entorno. Ello implica rastrear los términos usados por los clásicos y buscar su equivalente actual. Agricola dirigió también su mirada a la política y economía, para volver a la geología y mineralogía, ahora en Chemnitz. En 1534 se le nombró historiador de la corte de Sajonia. Durante veinte años desempolvó pergaminos y viejos cronicones. La excesiva franqueza de su resultado, el *Sippschaft des Hauses zu Sachsen*, un estudio crítico de los príncipes de Sajonia, explica que quedara sin publicar hasta 1963.

Cuatro meses después de su muerte apareció su principal obra, *De re metallica libri XII*, ilustrados con 292 grabados, que ofrecen un cuadro completo de toda la industria minera, desde la prospección y la geometría de los filones hasta las máquinas utilizadas, incluidas las fundiciones, y sin olvidar los procedimientos artesanales (canalones, etc.). Intercala una descripción precisa de la secuencia de los bancos que recubren en Mansfeld, al pie del Harz, el lecho de pizarras cupríferas. Se ha dicho que es la partida de nacimiento de la litoestratigrafía.

Mezcla de astronomía, astrología y alquimia es el poema que Tycho Brahe (1546-1601) escribió en homenaje a su hermana Sophie: *Urania Titani*, publicado ahora en edición crítica. Fechada en 1594, esta carta que supuestamente redacta Sophie a su prometido Erik Lange, un alquimista, refleja el pensamiento de su autor. Aunque no se sabe mucho sobre el particular, parece que Tycho experimentó la influencia paracelsista e investigó en química. Sí se sabe que distinguía entre la química médica, o espagírica, y la alquimia, o transformadora de metales; tenía sus reservas para con la segunda, a la que consideraba impracticable y moralmente inferior a las demás ciencias.

En su juventud Tycho se percató de que sus observaciones de las posiciones de las estrellas y los planetas no concordaban con las tablas astronómicas al uso. Las corregiría si dispusiera de instrumentos ópticos potentes, que quizás encontraría en otros países. Empezó a viajar. La enfermedad de su padre reclama su presencia y, a su muerte, se halla con fortuna suficiente para vivir de renta. Dos observaciones, revolucionarias, iban a definir su aportación a la astronomía. El 11 de noviembre de 1572 descubrió una supernova, una estrella que había explosionado y multiplicado cientos de millones de veces su luminosidad, lo que ponía en entredicho la cosmología aristotélica, hasta entonces vigente, que no admitía cambios en las esferas celestes allende la de la Luna. Cinco años más tarde, mientras se construía Uraniborg —su finca y observatorio, con potentes instrumentos para el seguimiento de las posiciones estelares y planetarias— registró el cometa de 1577, que, como Tycho demostraba con mediciones de sus posiciones en tiempos diferentes, aparecía por encima de la Luna. Se movía éste a través de las regiones del sistema solar, que se suponían compactas en esferas cristalinas que portaban los planetas.

Con todo, su cosmovisión y sentido de la física fueron aristotélicos. Entusiasta de Copérnico, se hizo más devoto de la geometría. El sistema planetario de Tycho es una inversión del sistema copernicano. El Sol y la Luna orbitan alrededor de una Tierra inmóvil, y la esfera de las estrellas fijas con centro en la Tierra gira en torno a nuestro planeta cada 24 horas. Los otros planetas entonces conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) estaban en órbitas que tenían por centro el Sol.

Privado de la ayuda oficial, buscó, en 1596, el patronazgo de Rodolfo II en Praga. Allí escogió a Johannes Kepler para sucederle. Los datos cosechados por el rigor observacional de Brahe le permitieron a Kepler descubrir los puntos débiles de las viejas teorías y acelerar el advenimiento de la nueva cosmología y astronomía, que culminó en la obra de Isaac Newton y el hundimiento de la teoría aristotélica. (L. A.)

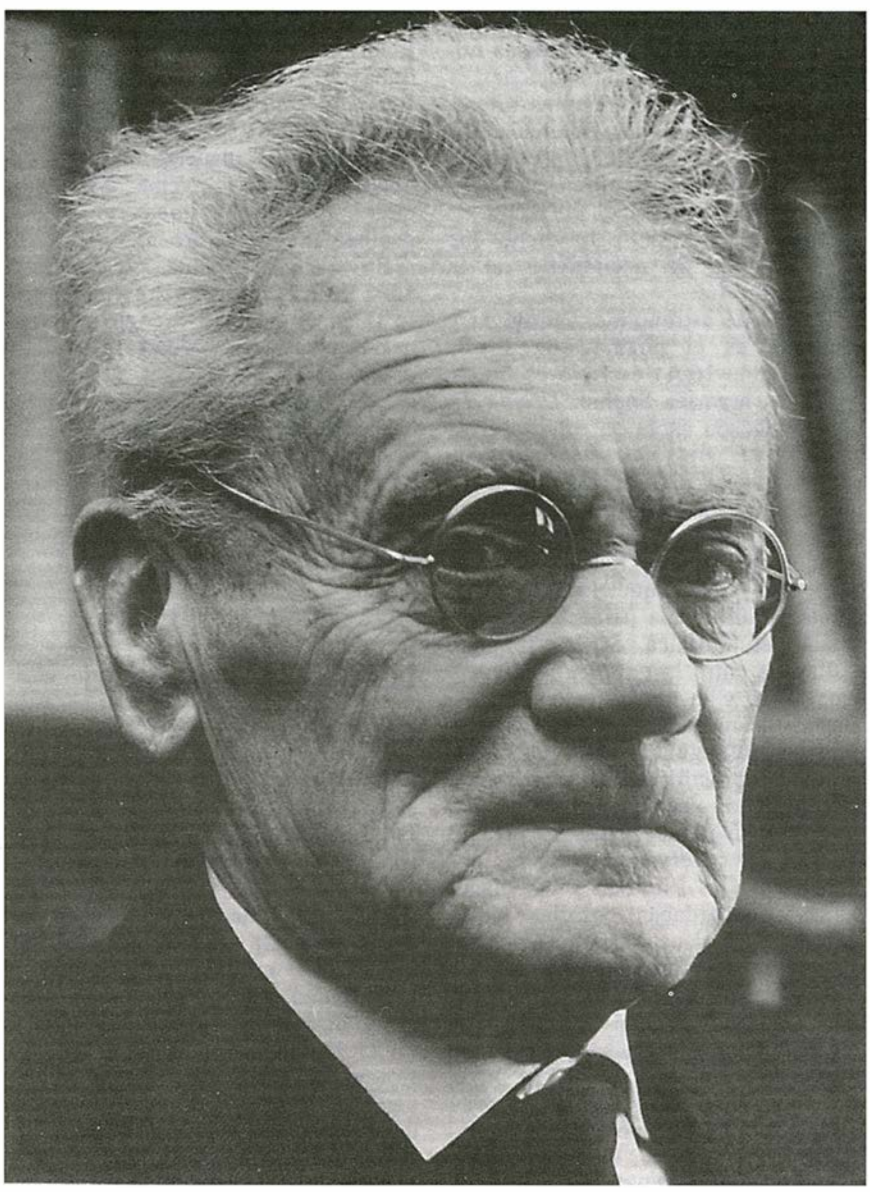
Ciencia y sociedad

Los Nobel

NOBEL LECTURES IN PHYSIOLOGY OR MEDICINE. 1971-1980. Dirigido por Jan Lindsten. World Scientific Publishing Co., Singapore-Londres, 1992.

La entrega de los premios Nobel representa uno de los momentos estelares en el reconocimiento por la sociedad del servicio que la ciencia y la cultura prestan al desarrollo de la humanidad. El Nobel de "Fisiología o Medicina", desde su origen uno de los galardones más preciados, se ha otorgado a los científicos más sobresalientes en el campo de la investigación biomédica. La selección y propuesta final de este Nobel la lleva a cabo el Instituto Médico-Quirúrgico Karolinska de Estocolmo, por lo que es costumbre que los laureados impartan en esta institución durante los días previos a la ceremonia de entrega de los premios una lección magistral —la "Nobel Lecture"— donde resumen su trabajo. Estas conferencias representan un legado intelectual de especial significado cuya importancia incluso aumenta con el transcurso del tiempo. La publicación en inglés de las "Nobel Lectures in Physiology or Medicine" —hecho que permite su accesibilidad para el gran público— se interrumpió en 1972. Ahora, con el libro que nos ocupa, la editorial World Scientific Publishing Co. renueva esta tradición.

El primer volumen incluye las conferencias entre 1971 y 1980. La obra está dividida en 10 secciones, cada una de las cuales comprende el discurso de presentación de los lau-



Karl von Frisch

reados pronunciado por un miembro del Instituto Karolinska, una nota autobiográfica de los premiados y la transcripción de las "Nobel Lectures". El libro así configurado es una excelente obra con gran atractivo no sólo para los especialistas, sino también para el lector interesado en los grandes hitos de la biomedicina. Las "Nobel Lectures", escritas con un estilo claro y preciso, están concebidas como verdaderas "biografías" de los descubrimientos. El relato de las observaciones experimentales o de los saltos y retrocesos conceptuales que condujeron al progreso en el conocimiento, está aderezado con comentarios, anécdotas y reflexiones. El resultado es una sucesión de lecciones excelentes por su contenido y por su exposición didáctica y amena.

Las "Nobel Lectures in Physiology or Medicine" de la década de los años setenta se relacionan con descubrimientos o avances metodológicos y técnicos que han tenido una enorme trascendencia en el desarrollo posterior de la investigación biológica e incluso la propia práctica médica. Entre éstos podríamos resaltar los relacionados con el mecanismo de acción celular de las hormonas, los que condujeron al descubrimiento de la estructura de los anticuerpos y a la caracterización del complejo mayor de histocompatibilidad, o los estudios sobre transferencia genética y las enzimas de restricción. En el aspecto técnico destacan el radioinmunoensayo, que propulsó la endocrinología clínica, y la tomografía axial computarizada, que fue la metodología pionera en el avance explosivo posterior de las técnicas de imagen aplicadas al diagnóstico y tratamiento de las enfermedades. En esta década se reconoció, además, la importancia del estudio del comportamiento animal para el conocimiento del hombre.

Junto a su importancia como vehículo de divulgación científica, las "Nobel Lectures" ilustran cómo la creatividad científica se manifiesta con rasgos característicos en cada investigador e influye de modo especial en la resolución de problemas diferentes. Impresionan, por ejemplo, el poder de generalización de Sutherland al intuir la trascendencia del descubrimiento del monofosfato de adenosina cíclico (AMPc) o la brillantez del diseño experimental de Edelman en sus estudios sobre la estructura de los anticuerpos. La lectura del capítulo de Frisch sobre el lenguaje de las abejas produce una sensación mezcla de delicia y asombro por la elegancia y simplicidad de los experimentos y la belleza de los resultados. Estas cualidades son a veces superfluas sin la sagacidad para percatarse de observaciones o hechos fortuitos que, como muestra magistralmente Blumberg al relatar cómo se detectó la relación existente entre el antígeno Australia y la hepatitis B, son en muchas ocasiones los que conducen a un descubrimiento imprevisto. El camino del descubrimiento suele ser tortuoso, por lo que la tenacidad y perseverancia son factores determinantes; lo vemos en el esfuerzo de Guillemin y Schally, quienes necesitaron procesar glándulas procedentes de un número ingente de ovejas para aislar unos miligramos de sustancia pura y poder demostrar la existencia de las hormonas hipotalámicas.

La ciencia, y sobre todo la actividad científica en las sociedades modernas, es acumulativa, por lo que necesita del esfuerzo conjunto de equipos y grupos. Se suele decir que si bien Newton veía muy lejos, nuestro alcance es mayor porque estamos encaramados sobre sus hombros. El punto de partida del científico depende de los "hombros" que le proporcionen instituciones de excelencia donde sea posible un ambiente intelectual que permita la maduración adecuada de los investigadores y la expresión de la creatividad científica. La última lección que nos da la aproximación "biográfica" a los descubrimientos es que antes que la ciencia están los hombres que la hacen posible. Los problemas científicos cambian con el tiempo o las modas, y las técnicas y metodologías evolucionan; el esfuerzo personal, la ilusión y la dedicación son, sin embargo, inalterables. (J. L.-B.)

Ecología

Lagos

THE TROPHIC CASCADE IN LAKES. S. R. Carpenter y J. F. Kitchell. Cambridge University Press; 1993.

El libro dirigido por Carpenter y Kitchell desarrolla uno de los temas centrales de la ecología, la incidencia de los factores ambientales y bióticos sobre la estructura de las comunidades, aplicada en este caso al estudio de los lagos. La novedad del libro se basa en la habilidad de los autores para combinar los factores ambientales con los relativos a la composición y actividad de la comunidad. En este enfoque destaca la importancia de las diferentes escalas espaciales y temporales.

A una escala global, el clima es el elemento determinante del tipo y grado de desarrollo de las comunidades de los lagos. Pero si se reduce la escala espacial de comparación a un nivel regional, se observa que, además de los aportes de nutrientes, del tiempo de residencia del agua o de la morfología del lago, inciden la competencia entre especies planctónicas y la cadena de depredadores más o menos desarrollada sobre la producción primaria. Durante muchos años ha predominado la visión de que los aportes de nutrientes, y en especial los que actúan como factores limitantes, son el único elemento regulador de las poblaciones planctónicas. El modelo de Vollenweider, que relaciona los aportes de fósforo con la concentración de clorofila, y su éxito relativo para predecir la evolución trófica de un lago habían reducido los organismos a meras comparsas a la hora de materializar el flujo de materia y energía dentro del lago.

Los autores desarrollan en su hipótesis de cascada trófica la idea de que los niveles altos de la comunidad influyen, a través de las interacciones tróficas, en la estructura de los niveles inferiores. La comprobación de esta hipótesis se ha basado en el estudio intensivo de tres lagos (Peter, Paul y Twesday).

Antes de analizar y ponderar los resultados obtenidos, se dedica un capítulo a la presentación de las manipulaciones y de los experimentos realizados, los objetivos perseguidos y la justificación de la elección de las variables estudiadas. Al exponer los métodos estadísticos empleados, los autores se detienen en los modelos ARIMA, las funciones de transferencia y el análisis de intervención en el estudio de series temporales. En mi opinión es una excelente muestra de la potencia de estos métodos en un momento en el que la información temporal que se acumula sobre muchos lagos empieza a ser importante.

La presentación ordenada de los resultados comienza por los peces, continúa con el zooplancton y fitoplancton y acaba con la actividad heterotrófica bacteriana y la búsqueda de los resultados de la manipulación en el registro fósil más reciente. La secuencia de la exposición es la habitual en los trabajos de ese dominio, tomando por hilo conductor la cadena trófica. Los modelos de simulación del comportamiento de redes tróficas, de acuerdo con su composición, empezaron antes que el trabajo de campo.

La comparación de los resultados es una mezcla de aciertos y sorpresas. Cuando se intenta ir más alla de las predicciones generales surgen problemas ligados a la histéresis de los sistemas, a la importancia de la escala temporal en que se trabaja y a otras muchas posibles causas. Los autores reconocen que la dinámica del fitoplancton se desvía de las previsiones basadas en un modelo fundado en la estructura de tamaños; asimismo, las respuestas de la red trófica a las manipulaciones de la comunidad de peces, aunque significativa, es menor que la prevista por los modelos de dinámica estacional. Desde un punto de vista general, la obra devuelve a los organismos el papel crucial en el funcionamiento de los ecosistemas que se había perdido en los últimos años en favor de los factores ambientales. (J. A.)



Dos lagos experimentales de Wisconsin

Astronomía

Supernova

THE SUPERNOVA STORY, por L. A. Marshall. Princeton, 1994.

Este libro es francamente recomendable. La primera edición es de 1988. Cuando el libro se escribió, entonces no se había producido aún un hecho trascendental en nuestro conocimiento de las supernovas, como fue la aparición de la supernova 1987A; al menos no se habían publicado los muchos estudios del que este singular acontecimiento fue objeto. Hay un antes y un después de la supernova 1987A, dada su relativa proximidad a nuestra galaxia, en la Gran Nube de Magallanes. La primera edición fue anterior; esta segunda edición es posterior.

El tema de supernovas no resulta restrictivo para un libro de divulgación, pues el autor nos habla también de otros temas relacionados, como son los restos de supernova, la evolución estelar, las dimensiones del universo, etc. Pero el aspecto más destacable es el histórico.

Es un libro que deben leer los aficionados y los profesionales de la astronomía, a quienes aseguro que disfrutarán. Dicho esto mi misión como crítico termina, y aprovecho lo que me queda de espacio para trasmitir algo leído en este libro que creo de interés para la historia de la astronomía española.

En 1572, Tycho Brahe observó la supernova que lleva su nombre, hoy convertida en resto de supernova, uno de los más estudiados y conocidos. Pero, ¿quién detectó la supernova por primera vez? El libro nos informa que fue Hyeronimus Munosius, en la Universidad de Valencia, el día 2 de noviembre, justo cuando la supernova se hizo visible. La supernova de Tycho debería llamarse de Jerónimo Muñoz". (E. B.)

Mani pulite

Por primera vez en la historia, ocho catedráticos italianos han perdido sus derechos tras ser acusados de corrupción en la concesión de plazas. ¿El cargo? Dar su voto a colaboradores de sus departamentos en vez de otorgárselo a otros candidatos mejor preparados en dos oposiciones. Pero no sólo se critica la arbitrariedad, sino también la endogamia, a las que podríamos añadir en nuestra nación la visión provinciana del lugar de origen y lengua del concursante.

Empaparse poco a poco

A escala nanométrica no había hasta ahora forma de conocer directamente la estructura de las películas y superficies líquidas, cuya importancia en biología y en ciencias de los materiales resulta innecesario ponderar. Cierto es que la microscopía de barrido está preparada para conseguir una resolución atómica, pero las puntas de sus sondas no pueden aproximarse hasta una superficie húmeda sin que las fuerzas de capilaridad perturben la capa líquida libre. Pero, ¿y si se recurre a la fuerza de polarización entre la punta de un microscopio de fuerza atómica y un sustrato, de mica por ejemplo? Entonces, si atendemos a los procesos de condensación y evaporación de una monocapa de agua sobre ese material, observaremos que la condensación —la formación de la película— atraviesa dos fases estructurales: hasta un 25 % de humedad, el agua crea islas bidimensionales de menos de 1000 angstrom de diámetro; al aumentar la humedad, se desarrollan también las islas y su morfología mimetiza la geometría de la superficie de la mica subyacente.

El ciclo del silicio

El silicio pasa por el océano en su ciclo geobiológico. Este elemento que representa el 27 % de la litosfera, se acumula en los sedimentos costeros y abisales. Cada año entran en los océanos unos 200 millones de toneladas, procedente de la erosión de las rocas y transportado por los ríos. En su forma disuelta lo toman diatomeas, silicoflagelados y radiolarios. Cuando éstos mueran, parte del silicio biogénico se disuelve y, parte, acaba en los sedimentos, donde sufre un proceso de mineralización.

A falta de pan...

Thioploca sp. es una bacteria marina filamentosa cuya área de distribución geográfica se extiende a lo largo de la plataforma continental de Perú y Chile. Vive en haces rodeados por una vaina común sobre el suelo oceánico, donde teje densos tapices. Desde los años setenta se sabía de su existencia. Pero, ¿cuál era su metabolismo? ¿que les permitía formar tales agregaciones? Se trata de un medio pobre en oxígeno, aunque rico en nutrientes. Ante esa situación, las bacterias emplean el nitrato como aceptor de electrones para la oxidación de las fuentes de azufre y el desarrollo quimiolitotrófico. Operan así acumulando, en su vacuola central —que ocupa hasta el 80 % del volumen celular—, nitrato de altísima concentración. No menos prometedora se presenta una nueva línea de investigación: el papel que *Thioploca* desempeña en el ciclo del nitrógeno de los afloramientos costeros, fecundos en pesca.

La pesca del camarón

Cuando de comer se trata, las esponjas no son nada melindrosas; absorben las partículas o los microorganismos que tienen cerca. Pero el descubrimiento de esponjas carnívoras en una cueva del Mediterráneo sugiere que el tipo Poríferos puede ser más diverso (y quizá más capaz de percepción) de lo que pensaban los científicos. Las esponjas, de la familia Cladorrícidos, fueron encontradas por Jean Vacelet y Nicole Boury-Esnault, de la Universidad de Aix-Marsella II. Se parecen a las esponjas de las grandes profundidades oceánicas.

El hallazgo de estos animales en aguas más someras permitió conocer su modo de alimentación. Las presas son atrapadas por filamentos cubiertos de pequeñas espículas en forma de gancho (*izquierda*). Células epiteliales de la superficie externa migran gradualmente hacia el alimento capturado, en este caso una gambita, y la envuelven (*micrografía de la derecha*). Una vez absorbida, la pitanza tarda varios días en digerirse, y crecen nuevos filamentos en el lugar de los antiguos.

STEVEN VAMES





Seguiremos explorando los campos del conocimiento



¿COMPARTIO BOHR SECRETOS NUCLEARES?, por Hans A. Bethe, Kurt Gottfried y Roald Z. Sagdeev

Niels Bohr se encontró con un agente soviético a finales de 1945. Aunque algunos le acusan de haber divulgado secretos nucleares, un memorándum descubierto hace poco prueba lo contrario.

¿QUE LE DIJO HEISENBERG A BOHR DE LA BOMBA?, por Jeremy Bernstein

En 1941, Werner Heisenberg y Niels Bohr se encontraron a solas en Copenague. Casi dos años después, Bohr enseñó en Los Alamos un bosquejo de lo que él creía era un arma nuclear ideada por Heisenberg.

ESTRELLAS BINARIAS DE NEUTRONES, Tsvi Piran

Estos restos estelares constituyen una prueba exquisita de la teoría einsteiniana de la relatividad. Su inevitable colapso desencadena las explosiones más estruendosas del universo.

DEDOS DE SAL DEL OCEANO, por Raymond W. Schmitt, Jr.

Una rareza a pequeña escala en el modo en que se mezcla el agua marina puede tener consecuencias a gran escala para la estructura del océano.

MOLECULAS DENDRIMERAS, por Donald A. Tomalia

Los químicos pueden ya construir supermoléculas fractales. Estos nuevos polímeros resultan de interés práctico lo mismo en biotecnología que en la protección del medio ambiente.

EL DETECTOR DE MICROCINTA DE SILICIO, por Alan M. Litke y Andreas S. Schwarz

Producidos con idénticos medios que los circuitos integrados, estos detectores ayudaron recientemente a descubrir el quark cima y son esenciales para otros importantes experimentos.

TEORIAS CUANTICAS DE CAMPOS TOPOLOGICAS, por J. M. Fernández de Labastida

Mecánica cuántica y topología protagonizan las nuevas relaciones, instauradas en los años ochenta, entre física y matemática. Ese maridaje ha cristalizado en las teorías cuánticas de campos topológicos.

LA CONSERVACION DEL PASADO, por Marguerite Holloway

Los conservadores van a la carrera para salvar los monumentos amenazados por el desarrollo, la contaminación, los saqueos y la negligencia. En el proceso, están transformando el campo de la arqueología en una nueva ciencia.

